

İZMİR METRO PROJESİNDE EPBM TÜNEL UYGULAMASI

Başar ARIOĞLU (1)

Ah YÜKSEL (2)

Dr. Ergin ARIOĞLU (3)

GİRİŞ

İzmir Metro sistemi, ulaşım master planı çerçevesinde toplam uzunluğu 45 km'ye varacak olan ve Çiğli'de Buca'ya, Bornova'dan Narlıdere'ye, İzmir'in metropol bölgesinin tamamını kapsayacak yüksek kapasiteli bir sistem olarak planlanmıştır. Bu sistemin ana omurgasını oluşturan Üçyol-Halkapınar hattı, depo sahası-atölye ve Bornova kolunu içeren 1. aşama inşaatı Yapı Merkezi-Adtranz Konsorsiyumu tarafından başarı ile tamamlanmıştır. Konak, Çankaya ve Basmane İstasyonları arasında, yoğun yapılaşma, ana trafik arterlerinin burada bulunması, su, pis su kanal hatları ve telefon hatları gibi altyapıların yüksek yerdeğiştirme maliyetleri dolayısıyla bu bölümün tünelle geçilmesi tercih edilmiştir. Ayrıca buranın tünelle geçilmesiyle güncel dolgu tabakası içerisinde bulunan arkeolojik kalımlara zarar verilmesi de önlenmiştir. Var olan jeolojik koşullar, güzergah üzerinde ve civarında bulunan yapılaşma gözününe alınarak yapılan fizibilite çalışması sonucu tünelin EPB (zemin basıncı dengeleme) türü, tam cephe kazı yapabilen tünel makinesi ile yapılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır. (1,2)

Bu çalışmada, EPBM tünel uygulamasının sonuçlarına ve genel bir değerlendirilmesine yer verilecektir.

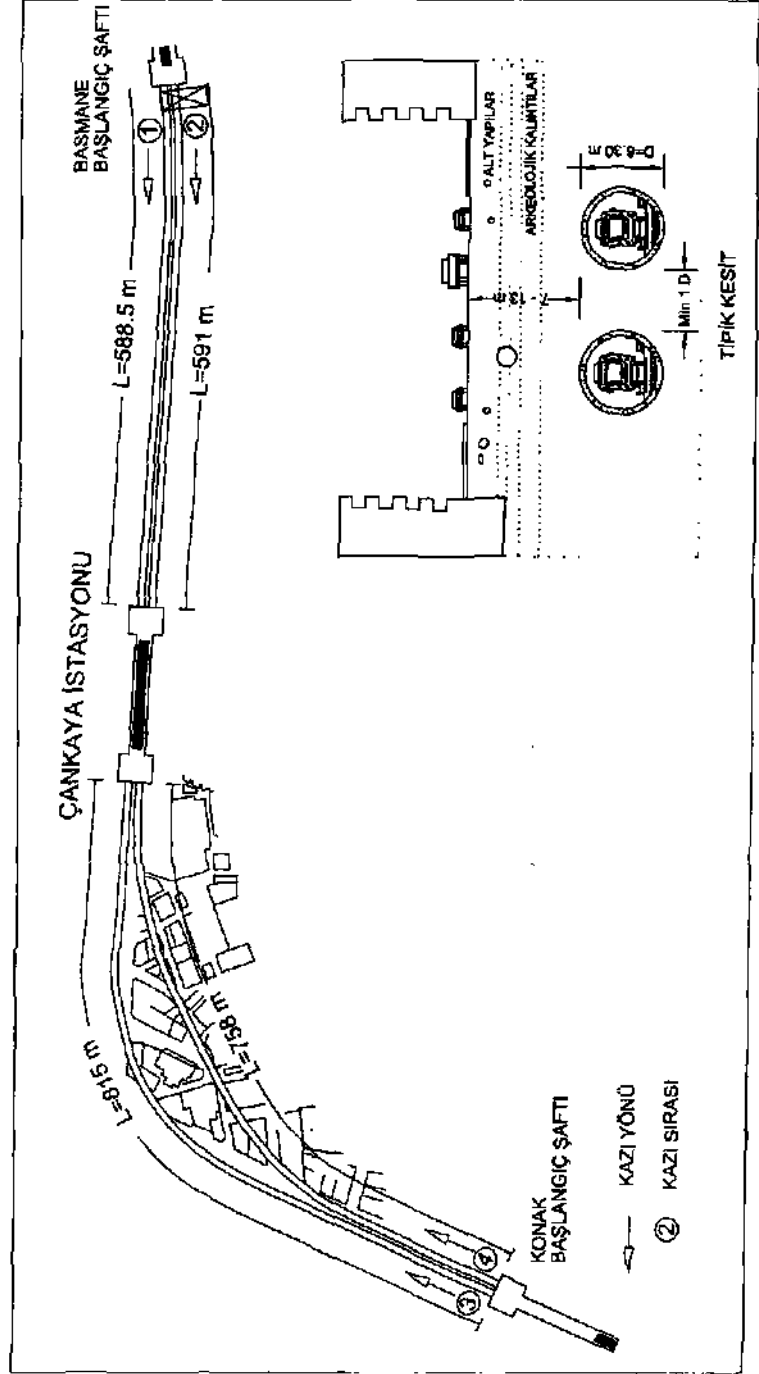
ÜMMÜHAN ANA İKİZ TÜNELLERİ

Güzergahın bir bölümünde küçük yarıçaplı ($R=250$ m) dönüş yeralması, üzerinde ve yakınında bazıları kazıklı olan denn temelli (max.5m) çok katlı binaların bulunması nedeniyle yan yana ikiz tünel şeklinde planlanmıştır. Tünel 6.50 m kazı çapına ve 5.70 m bitmiş iç çapa sahip, toplam uzunluğu 2,753m olan dört adet tüpten oluşmaktadır (Şekil-1).

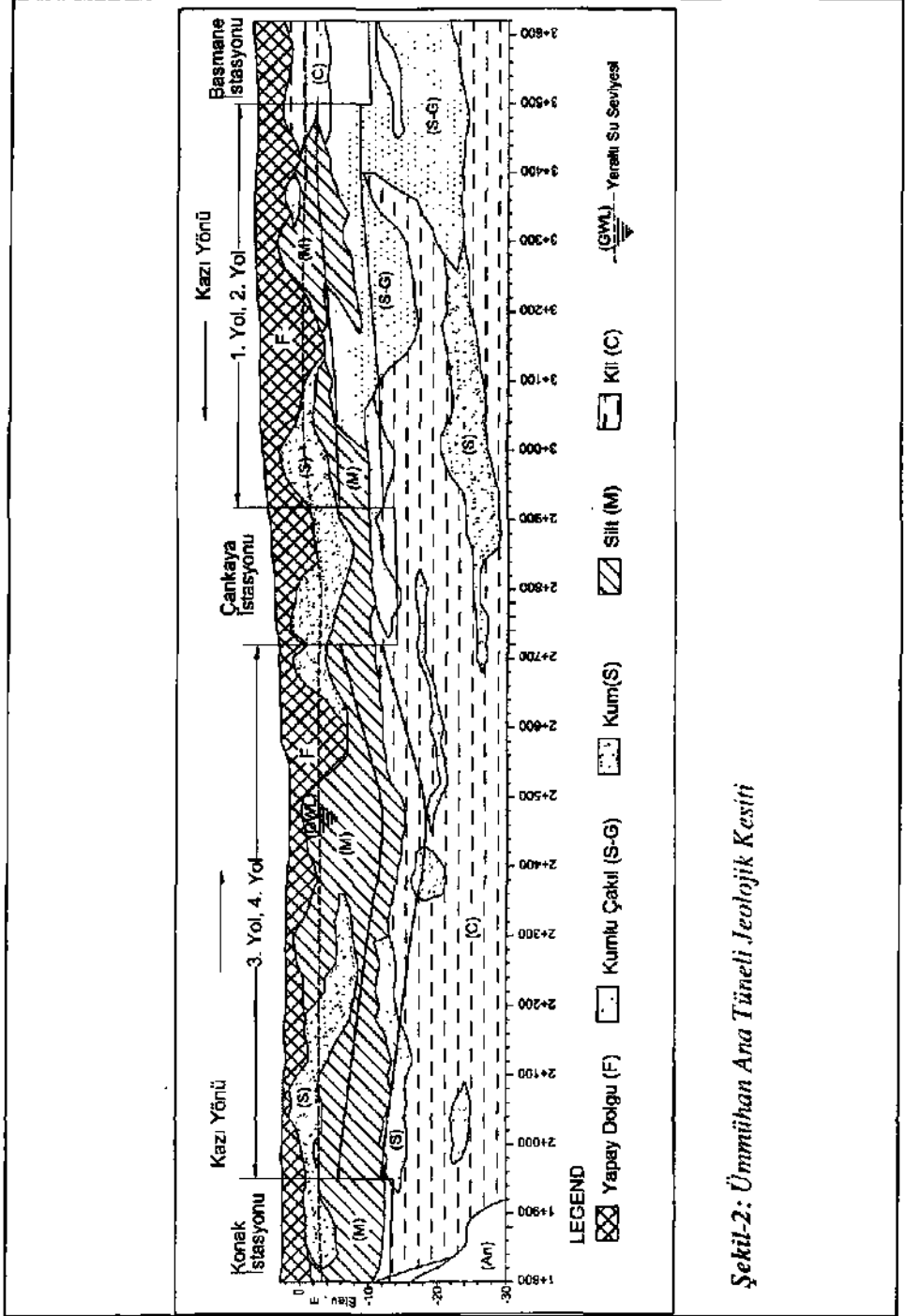
(1) İnşaat Y. Muh. Genel Müdür, Yapı Merkezi İnşaat ve A.Ş.

(2) Maden Y. Muh. Ağ. Ins. G.İ.İ. İnş. Yapı Merkezi

(3) Prof. Dr. Muh. A.İ.-Ge. Bölümü, Yapı Merkezi



Şekil-1: Ümmühan Ana Tünel Geçerşi



Tüneller her iki yanında, bazıları iki-üç katlı tarihi-yığıma taş, diğerleri ise çok katlı (6-8 kat) yapılar bulunan caddenin altından geçmektedir. Ancak Konak İstasyonundan sonraki 200 mlik kısımdan sonra yer alan dönüşte tüneller, kazık temelli binaların ve derin kazı çukuruna sahip pompa istasyonu yapısının bulunması nedeniyle hatlar birbirinden ayrılarak ve binalarında altından geçerek ilerlemektedir. Tünel üzerindeki örtü kalınlığı cadde altında 6-7 m iken yukarıda belirtilen kısımda binaların bodrum katları olması nedeniyle 13 m ye kadar derinleştirilmiştir (2).

Jeoloji-Tabakaların Jeomekanik Özellikleri

Ummühanana tüneli güzergahında tamamen ayrılmış andezit ürünü olan killer ve onun üzerinde genç yaşlı denizel çökeller bulunmaktadır (Şekil 3). Denizel çökeller Konak-Çankaya arasında d'ha çok killi silt boyutunda olup çapraz tabakalı olarak kum bantlarını kum ceplerini içermektedir. Bu kısımda tünel ilkin şiltler içerisinde ilerlemekte, güzergah kotunun derinleşmesi ile birklikte aynanın alt kısımları sert killer kaplamaktadır. Çankaya-Basmane arasındaki bölümde ise tünel killi silt ve kumlu çakıl tabakalarında ilerlemektedir. Yeraltı suyu konak tarafında yaklaşık 1.5m derinlikte, Çankaya-Basmane tarafında ise 4-6 m arasındadır (3).

EPB Tünel Kazı Makinesi

izmir Metrosu zemin koşulları için özel olarak tasarlanmış Herrenknecht marka EPB makinesinin şild çapı 6,54m, kesci kafanın çapı ise 6,56m dir. Kazılan malzeme kazı odasının tabanına bağlı bir burgulu (Screw) konveyör vasıtası ile dışarı alınmaktadır. Ayna yüzeyindeki basıncın izlenebilmesi için içm kazı odasında farklı seviyelerde basınç sensöleri bulunmaktadır. Burgulu konveyör girişinde basınç seviyesi kazı odası ile aynıdır, ancak basınç, çıkışta bulunan sürgülü kapağın açıklığı değiştirilerek atmosfer basıncına eşit hale getirilir.. Bunu ayarlamak için yine burgulu konveyöre de sensörler yerleştirilmiştir.(4)

Ayna stabilitesinin sağlanması için uygun ayna basıncının temini ve bununla birlikte kazı haznesinden boşaltmanın kontrollü yapılması gereklidir. Zemin cinsine bağlı olarak bentonit bulamacı veya köpük malzemesi ile 'zemin şartlandırması" (soil conditioning) yapılabilmektedir. Zemin şartlandırması, kazılan zemine iyi plastik deformasyon, düşük içsel sürtünme, düşük perméabilité ve yumuşak kıvam özellikleri kazandırmaktadır (5).

Zemin şartlandırması, çakıllı kumlu zeminlerin bulunduğu bölgelerde şartlandırma kimyasal köpük ile, kili ve siltli kısımlarda ise bu işlem bentonit bulamacı ile yapılmıştır. Köpük içerisinde çevre dostu polimer kimyasal ve köpük yapıcı "foam surfactans" kullanılmıştır. Kazılan malzeme hacmi

Zırh / Kazı Çapı	6,52 m/6,56 m
Zırh Uzunluğu	7,3 m (Üç Parçalı)
Ağırlık	325 t (Seviş Ünitesi Dahil: 477 t)
Toplam Uzunluk	74 m
İlerletme Sistemi	Toplam 28 Piston (2x14 Pes)
Toplam İtme Gücü	44.300 kN/350 bar
İtme Hızı	0,30 m/min.
Kesici Kafa Dönüş Hızı	Sağ/Sol 0-2,5 m/dak
Kesici Kafa Torku	5000 kN. m
Çalışma Basıncı	Maks. 3 bar
Zemin Şartlandırması	Bentonit Bulamacı/Kimyasal Köpük
Enjeksiyon	Zırh Cidarındaki 6 Kanaldan Kuyruğa
Su Geçirimsizlik	3 sıra Çelik Fırça (Kuyruk Sonunda) + Gres (maks.30 bar)
Kazı Boşaltma-Taşıma	B argulu Konveyör+Bant Konveyör
Segment Yerleştirme	Üç boyutta serbest hareketli vakumlu kol
Yönlendirme Sistemi	Bilgisayar Kont., Tek Laserli Total Station
Toplam Kurulu Güç	1600 k VA

Tablô-1 EPB Makinesinin Karakteristikleri (4)

başına 300-500 İt/m³ köpük malzemesi kullanılmış olup ortalama malzeme tüketimi polimer ve surfactant için değerler sırasıyla 0,01-0,5 kg/m³ ve 0,5-1 kg/m³ olarak rapor edilmiştir (6). Zemin şartlandırması ile zemin özellikleri iyileştiğinden ayna stabilitesi daha güvenli bir şekilde sağlanmaktadır. Bunun yanı sıra kesme kafasına gelen tork azalmakta, kazılan malzeme kolaylıkla dışarıya alınabildiğinden burgulu konveyörde oluşan aşınmalar da azalmaktadır.

Burgulu konveyörden alınan malzeme bir banta aktarılmakta ve lokomotif tarafından çekilen vagonlar ile de şafta gönderilmektedir. Malzeme taşınmasında 2 servis katan kullanılmıştır. Bir servis katarı 1 diesel lokomotif, 3 segment arabası, 1 enjeksiyon kazanı ve 6 çamur vagonundan oluşmaktadır.

Makine il ilgili karakteristik bilgiler aşağıdaki tabloda özetlenmiştir.

EPB Tünel Kazı Makinesi

Kazılan malzeme kesme kafasındaki açıklıklardan kazı haznesine alınarak bulamaç haline getirilmektedir. Kazılan malzeme, önceden hesaplanan ayna basıncını koruyacak şekilde burgulu konveyör ile dışarı alınırken aynı anda makine kendisini itme silindirleri ile sürekli olarak ilerletmektedir. Kazı operasyonu sürerken aynı anda kazılan cidar ile segment arasında kalan yaklaşık 12 cm'lik boşluk hemen enjeksiyon malzemesi ile doldurulmaktadır. Enjeksiyon karşısında akıcılığı sağlamak için bentonit, bağlayıcı ekonomisi için uçucu kül kullanılmıştır. Karışımın bileşenleri şöyledir; (2)

Malzeme	Miktarı, kg/m ³
Çimento	130
Uçucu kül	420
Kum (0-5 mm)	1058
Bentonit	15
Su	400

Enjeksiyon malzemesi karştıncılı bir vagondan back up ünitesinde yer alan bir pompa ile pompalanmakta, şild cidarında kuyruğa giden 6 adet kalandan boşluğa ulaşmaktadır. Söz konusu bu boşluğun hemen doldurulması ve ayna basıncının korunarak kazı malzemesinin kontrollü biçimde boşaltılması, yüzeye yansiyacak tasman miktarını önemli ölçüde minimize etmektedir. Bu dumm EPB kazı yönteminin en önemli avantajını oluşturmaktadır (5).

Bir kazı adımı ilerleme yapıldıktan sonra kazı operasyonu durdurulmakta, şild içerisindeki erektör vasıtası ile segmentler yerleştirilmektedir. Erektör üç yönlü hareket kabiliyetinde ve segmentleri tutabilecek vakumlu kola sahiptir. Ring 120 cm genişliğinde ve anahtar taşı ile birtilkte 7 parçadan oluşmaktadır. Kalınlığı 30 cm olan segmentler BS 45 dayanımında betondan üretilmiştir. Segmentler yatay ve düşey dönüşleri sağlayabilecek geometride tasarlanmış, anahtar taşının pozisyonu ile 14 farklı kombinasyonda yerleştirilebilmektedir. Segmentier arasında su geçirimsizliğin sağlanması için elastomerik conta kullanılmıştır.

Tünelin yönlendirmesi tek laserh elektronik teodolit ve özel bilgisayar yazılımı ile kontrol edilmektedir.

Kazı İlerlemesi

Tünel makinesi şantiyeye Mayıs 1997'de gelmiştir Basmane İstasyonunda şartın giriş hazırlıklarının yapılması, makinenin ilk montajı ve elektrik.

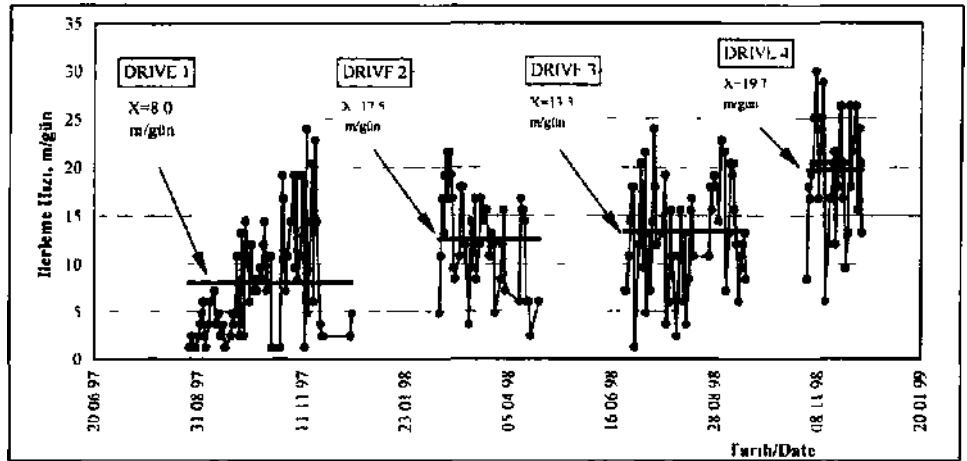
basınçlı hava soğutma servis ünitelerinin kurulması 4 aylık bir süre almıştır. Basmane İstasyonundan Çankaya İstasyonuna doğru 1 ve 2 no'lu yolların kazısı yapılmıştır. 3 ve 4 no'lu yolların kazısı ise Konak İstasyonundan Çankaya İstasyonuna doğru gerçekleştirilmiştir.(8)

Kazı işleri 25 Ağustos 1997'de Basmane İstasyonundan 1 nolu yola ait ilk ringin yerleştirilmesi ile başlamıştır. Kazının başlangıcındaki ilk 1 aylık dönemde kazı hızları ortalama 3 m/gün civarında seyretmiştir (Şekil-3). Daha sonraki dönemlerde kazı hızı giderek artmış ve 24 m/gün düzeylerine kadar yükselmiştir. Bu drive da ortalama ilerleme hızı 8.0 m/gün olarak gerçekleşmiştir.

Kazı hızındaki daima iyi yönde gelişen bu değişim şu nedenlerle açıklanabilir.

- Başlangıçta tek vardiyeli olarak çalışılmış, çalışanların ekipmanları tanıma, öğrenme ve ustalaşmaları bu evrede olmuştur.
- İlk defa kurulan sistemlerdeki arıza ve ortaya çıkan uyumsuzluklar giderilmeye çalışılmıştır.
- Son olarak enjeksiyon karışımında yapılan iyileştirmeler ile ilk zamanlarda boru hatları ve şild içerisindeki kanallarda meydana gelen tıkanma problemleri çözülmüştür.

Drive Tin tamamlanmasından sonraki iki aylık süreçte kesici kafanın bulunduğu şild Çankaya İstasyonunda d mante edilerek Basmane İstasyonuna taşınmış ve Drive 2'nin kazısına hazır hale getirilmiştir. Drive 2'nin kazısı 47 iş gününde tamamlanmıştır. 590 m uzunluğundaki bu tünelde maksimum 24m/gün ilerleme hızına ulaşılmış olup ortalama 12,5m/gün olarak kaydedilmiştir. Drive 3 ve 4'ün kazısı için kazı makinesi, backup sistemi ve servis



Şekil-3: Vmmuhan Ana Timcimde İleri lerne Hızları

burada yapılan bakım-onarım da konveyör burgusunda kabul edilebilir limitin üzerinde, Hcm'lik bir aşınma meydana geldiği farkedilmiştir. Bu durumda aşınmış burğu yenisi ile değiştirilmiştir. Bu aşırı aşınmanın I. ve 2. yol'da tünelin geçtiği kumlu çakıl tabalarının içerdiği andezit çakıllarından kaynaklandığı düşünülmüştür.

EPB Makinesini Kazı Performansı

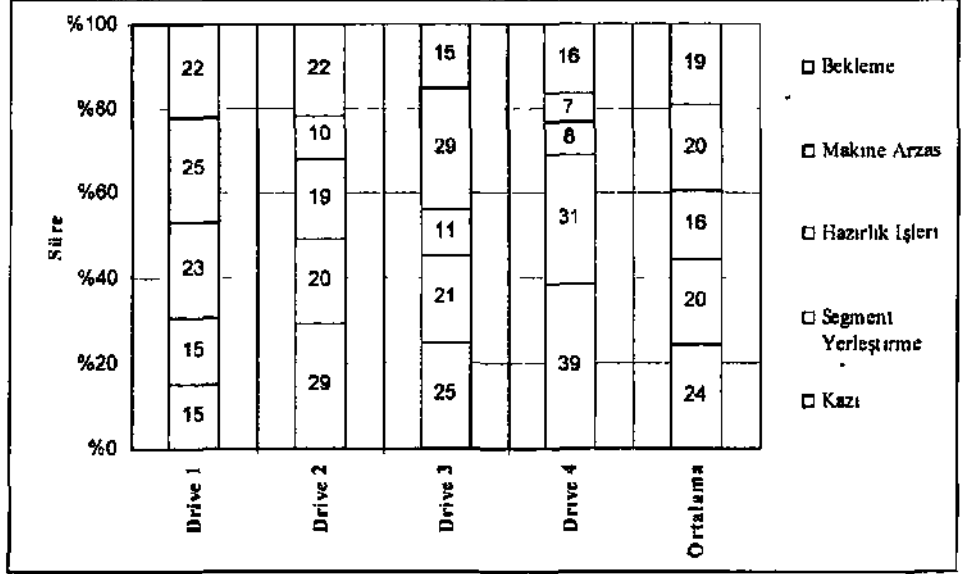
Ümmühan Ana İkiz Tünellerine ait üretim kayıtları istatistik analize tabi tutulmuştur. Bu değerlendirmede ara mobilizasyonda geçen süreler hariç tutulmuş, sadece kazının başlangıcı ve bitimi arasında kalan sürede yapılan faaliyetler gözönünde tutulmuştur. Elde edilen ortalama işlem sürelerinin dağılımı ve efektif Çalışma Süresinin Dağılımı'na ilişkin sonuçlar Şekil 4 ve 5'de gösterilmiştir.

Şekil.4'den görüldüğü gibi tünel kazı çalışmaları sırasında-geçen sürenin %39'unun üretim dışı (beklemeler ve arızalar) olduğu, %44'ünün ise doğrudan üretim faaliyetleri ile geçtiği anlaşılmaktadır. Diğer kelimelerle "makine verimliliği" ortalama olarak %44 mertebesinde gerçekleşmiştir. "Makina verimliliği" başlangıçta %30 seviyelerinde iken giderek artmış ve son yol kazısında %68 mertebesine ulaşmıştır. Bu durum çalışan ekibin ve ekipmanın uyumluluğunun giderek artması, ustalık seviyesinin yükselmesi ile alakalıdır. Tersine üretim dışı geçen sürelerde azalmış olduğu farkedilmektedir. Diğer taraftan ekibin ustalık seviyesindeki artışın diğer bir göstergesi de hazırlık çalışmalarında geçen sürenin azalması olduğu belirtilebilir.

Bir ringin yerleştirilmesi için geçen süreler dikkate alındığında keza aynı sonuçlar farkedilmektedir. Başlangıçta ring yerleştirme süresi toplam 267 dakika iken son yolda bu süre 88 dakikaya inmiştir. Genel ortalamaya bakıldığı zaman bir ring için geçen süre 161 dakikadır.

Yüzey Oturmaları ve Ayna Stabilitesi

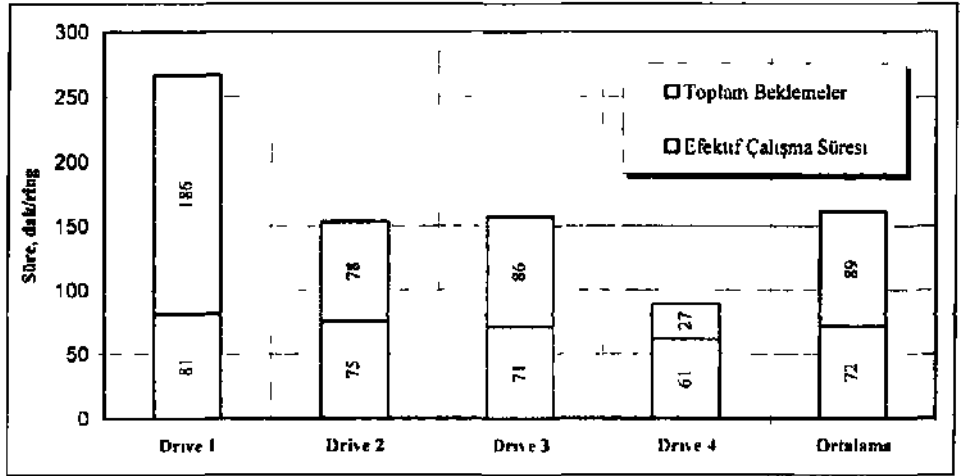
Kazı işlemine başlamadan önce, kazı faaliyetlerinden kaynaklanacak yeryüzü oturma (tasman) hareketlerinin izlenebilmesi amacıyla tünel güzergahında zeminde ve binalarda oturma ölçüm noktaları tesis edilmiştir. 30 - 100 m arasında değişen aralıklardaki ölçüm kesitlerinin herbirinde 3-5 adet ölçüm noktası bulunmaktadır. Toplam olarak, zeminde 85 adet, binalarda ise 317 adet ölçüm noktası tesis edilmiştir. Yanal yerdeğişimlerin izlenmesi amacıyla da 8 noktada inklinometre yerleştirilmiştir. Ayrıca tünellerin etki alanında yer alan bütün yapılarda fotoğrafik durunf tesbiti yapılmış ve mevcut yapısal kusurlar kayda alınmıştır. Tarihi Önemi bulunan iki adet yapıdaki {Vakıflar Bankası ve Basmane Gar Binası) mevcut çatlaklara da çatlak ölçerler yerleştirilmiştir. Kazı süresi boyunca toplam 5040 adet deformasyon



Şekil-4 İşlem Sürelerinin Dağılımı

üniteleri ve şantiye tesisleri tamamen Konak istasyonuna taşınmıştır. Drive 3 ve Drive 4 kazılarında ortalama ilerleme hızları sırasıyla 13,3 ve 19,7 m/gün olarak sonuçlanmıştır. Ümmühan ana ikiz tünellerinde ilerleme hızı rekoru Drive 4 kazısı sırasında 30 m/gün olarak kaydedilmiştir. (Şekil-3)

Kazı aşamaları arasındaki montaj - demontaj sırasında tüm sistemin bakımı ve tamiri yapılmaktadır. Makine Konak İstasyonuna taşındığında,



Şekil-5 Ring Yerleştirme Süreleri

ölçümü yapılmıştır. Yapılan bu Ölçümlerde kaydedilen edilen maksimum nihai oturma değen 21 mm olarak kaydedilmiştir (8).

Tasman hareketlerinden kaynaklanan, birim ilerleme başına düşen hacim kaybı (K)

$$K = \frac{\Delta V}{V} = \frac{2,5 \cdot i \cdot S_{max}}{\frac{\pi}{4} D^2}, \%$$

bağıntısı ile bellidir(7, 5)

Burada:

i = Yüzey tasman eğrisinin dönüm noktasının tünel eskenine olan uzaklığı olup tünel derinliği cinsinden siltli kil ve killi formasyonlar için ampirik $i=0,5 \cdot (H+D/2)$ bağıntısı ile bulunabilir (7,9),

S_{ma} = Tünel ekseninde yüzyde ölçülen oturma değeri,

D = Tünel kazı çapı, H = Tünel eksen derinliği.

Ölçülen makismum tasman değeri için hacim kaybı,

$$i = 0,5 \times (8,4 \text{ m} + \frac{6,5 \text{ m}}{2}) = 5,8 \text{ m},$$

$$K = \frac{2,5 \times 8,6 \text{ m} \times 0,021 \text{ m}}{\frac{3,14}{4} (6,5)^2} = 0,0092 = \% 0,9$$

olarak hesaplanır.

Ortalama değerler ($S_{ma}=7 \text{ mm}$ ve $H=9,62 \text{ m}$) gözetilecek olursa aynı büyüklük;

$$K = \frac{2,5 \times 8,6 \text{ m} \times 0,007 \text{ m}}{\frac{3,14}{4} (6,5)^2} = 0,0092 = \% 0,9$$

bulunur Açıkırki hesaplanan parametre büyük ölçüde uygulanan tünel teknolojisi ile yakından ilgilidir. Benzer teknoloji (EPB) ile Nil Nehri Aluvyoner zeminlerinde açılmış olan 9,45 m çaplı Kahire Metrosunda bu değer % 0,77-1,32 aralığında verilmektedir(10).

Ayna stabilitesinin bir ölçüsü olarak bilinen zemin stabilité sayısı N ise

$$\frac{\sigma_v + \gamma \cdot Z_0 - \sigma_F}{C_U}$$

bağıntısı ile verilmektedir (7,9)

Burada

σ_v = Bina ve trafik yüklerinden kaynaklanan ek yük Bu değer için

σ_v = 10 kPa değen kabul edilmiştir.

γ = Zeminin ortalama birim hacim ağırlığı. Laboratuvar deneylerinde

γ = 17-21 kN/m³ olup ortalama değen 18 kN/m³'dir(3)

Z_o = Tünel ekseninin derinliği, $Z_o = (H+D/2)$

σ_F = Tünel eksenindeki ayna basıncı Ummuhan Ana ikiz Tünelinde geçilen formasyon ve tünel derinliğine bağılı olarak $sF = 160 - 240$ kPa arasında uygulanmıştır (8)

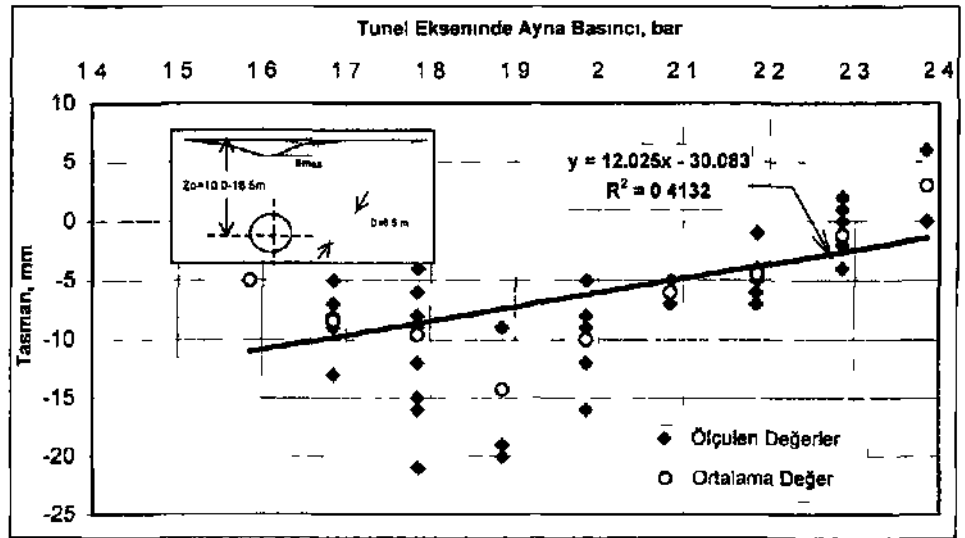
C_u = Geçilen zeminin drenajsız kohezyonu olup laboratuvar deneyinde $C_u = 30-80$ kPa saptanmıştır (3)

Stabilite sayısı ortalama değerler için

$$N = \frac{10kPa + 18 kN / m^3 \times 12,8 m - 200 kPa}{50 kPa} = 0,8$$

bulunur. Bu değer "Az akma-Elastik zon" şartlarına karşı gelmektedir(7)

Diğer yandan ölçülen maksimum tasman değerlen ile uygulanan ayna basınçları arasında istatistiksel olarak negatif eğimli lineer bir ilinti olduğu belirlenmiştir. (Şekil 6)



Şekü-6 lasıman -A\na Basına De tuştun

Yukarıda hesaplanan iki büyüklük ve elde edilen istatistiksel ilişki uygulanan ayna basınçlarının tasarım aşamasında hesaplananlar ile uyum içinde olduğu ve yüzey taşımanlarının iyi bir şekilde kontrol edildiğini göstermektedir.

SONUÇLAR

Şehirleşme alanlarındaki tünel çalışmaları oldukça zordur. Değişken zemin koşulları, arkeolojik kalıntılar ve politik ve hukuksal konular, durumu daha da içinden çıkılmaz hale getirebilmektedir. İzmir Metro Projesi böylesi çok zor koşullarda değişik tünel teknikleri başarı ile kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sözleşmenin tasarım+uygulama karakterinde olması aynı zamanda yapımcıya değerli deneyimler kazandırmıştır. Böylece İzmir Metro Sistemi ilave maliyet getirmeksizin planlanan zamanda teslim edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar bu çalışmanın yapılmasında gösterdikleri yakın ilgi ve akademik destekleri için Yapı Merkezi Holding Yönetim Kurulu Başkanı Sn. Dr. Müh. Ersin ARIOĞLU'na, Yapı Merkezi Yönetim Kurulu Murahhas Üyesi Sn. İnş. Y. Müh. Emre Aykar'a, ve İzmir Metrosu Proje Müdürü Sn. İnş. Müh. Naim İŞLİ'ye teşekkür etmeyi görev sayarlar. Çalışmada belirtilen tüm görüş ve değerlendirmeler yazarlarına ait olup Yapı Merkezi-Adtranz Konsorsiyumu'nu ve diğer herhangi kurum ve kuruluşu bağlamaz.

REFERANSLAR

- 1. Arioğlu, B.: Engineering Achivement at Ummuhan Ana Tunnel, World Tunneling (January/February 2000), pp 37-39*
- 2. Yapı Merkezi, Mühendislik Grubu, izmir Metro Ummuhan Ana Tünel Projesi, Yapı Merkezi (1996), İstanbul*
- 3. Yapı Merkezi, izmir Metrosu km 1+550 ve km 3+800 arasının Geoteknik Raporu, Rapor No 9210 -TR-J058.T, Yapı Merkezi (1996), istanbul*
- 4. Yapı Merkezi, İzmir Metrosu EPEM Tüneli İnşaat Yapım Yöntemi ve Teknik Özellikleri, Yapı Merkezi, 1997, İstanbul*
- 5. Arioğlu, B , Arioğlu, O. S . Arioğlu, E.: İzmir Metrosu EPBM Makinesinin Kazı Performansı, , 16, Madencilik Bilimsel ve Teknik Kongresi, Haziran 1999. TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara, pp 207-214*

6. Jancsecz, S., Krause, R, Langmaack L. • *Advantages of Soil Conditioning in Shield Tunneling, Experiences of LRST Izmir, Proceedings of The World Tunnel Congress'99 OSLO "Challenges for the 21 th Century" Alten et al (eds) (1999), Balkema, Rotterdam*
7. Arioğlu, E., Köylüođlu, O.S. *İzmir Metrosu TBM Tünel Metodu için Çökme ve Arın Basıncı Deđerlendirmesi, İç Rapor No: YMIAR-GE196-3B, AR-GE Bölümü, Yapı Merkezi, Aralık 1996, istanbul*
8. *Yapı Merkezi, İzmir Metrosu Ümmühan Ana Tüneli Saha Kayıtları, Yapı Merkezi İzmir Metrosu, 1997-1998, İzmir*
9. Léca, E.: *Analysis of NATM and Schild Tunnel in Soft Grounds, PH Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State Universty (1989), Blacksburgs USA, 476pgs*
10. Mair, R.J.: *Geotechnical Aspects of Design Criteria for Bored Tunnelling in Soft Ground, Tunnels and Meti-opohses in Soft Ground, Negro Jr & Ferrira (eds) (1998), Balkema Rotterdam*
11. Rankin, WJ : *Ground Movements Resulting from Urban Tunneling, Prediction and Effects, Conference on Engineering Geology of Underground Movements (1988), Nottingham, pp 79-92*

