

İSTANBUL METROSU TÜNELLERİNDE BORU ŞEMSİYE (UMBRELLA ARCH) YÖNTEMİNİN UYGULANMASI VE SONUÇLARI

Cevdet KURT (*)
Öner YILMAZ (**)
Selçuk ŞİMŞEK (***)

ÖZET

Metro tünellerinin kazı tekniğindeki temel hedef, tünel stabilitesi ile beraber mevcut yapılaşma ve alt yapıların olumsuz etkilenmesine neden olmayacak yöntem ve önlemlerin uygulanmasıdır. Bunun için deformasyonu önleyecek kazı ve imalat teknikleri kullanılmalı ve sonuçları incelenmelidir. Bu işler sırasında farklı disiplinlerin bir orkestra uyumu içinde çalışması zorunluluğu vardır. Ancak bu şekilde riskler azaltılır ve sorunlar çözülebilir, nitelikli tünel kazısı gerçekleştirilebilir. Bu bildiride yerleşim birimleri altında yapılan kazılarda ortamın başlangıçtaki dengesini koruması, yada gerilme boşalmalarına bağlı gevşemeleri engellemek için uygulanan BORU ŞEMSİYE yöntemi ve sonuçları arazide birebir izlenmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir.

GİRİŞ

Yapılaşma olmayan yerlerdeki kazı ve destekleme çalışmalarında amaç tünelin ayakta kalmasıdır. Yüzeyde oluşacak hareketlerin hayati Önemi yoktur. Bu yüzden çözümlerde sadece tünel yöneldir ve plastikleştirici kazı teknikleri uygulanabilmektedir. Oysa yerleşim bölgesinde açılan tünellerde gevşeme ile sökümlerin önlenmesi ve zaman faktörünün maksimum verimle kullanılması gerekmektedir. Gerek çevresel, gerek tünel kazı aynasındaki zamana bağlı gerilme-deformasyon ilişkisi ve çevre zemin plastikleşmesi sonucunda öngörülen sınırları aşan etkileşimler olabilmektedir.

Metro tünellerinde ölçü yukarıda sözü edilen etkileşimler sonucunda duraylılığın bozulması yada bir göçüğün oluşması değildir. Tünel kazı

(^) Y inşaat Mühendisi, İstanbul Metrosu İnşaatı, Anadolu Metro Ortaklığı (AM O)
(**) Maden Mühendisi, Sonei Temel Mühendislik İnşaat ve Ticaret A Ş (S TM)
(≡•**) Maden Mühendisi, İstanbul Metro İnşaatı, Anadolu Metro Ortaklığı (AM O)

aynasındaki gerilmeler sonucunda oluşan malzeme kaybı tünelde hiçbir deformasyon olmasa bile yüzeyde oturmaya neden olabilir. Ayrıca yer altı suyunun drenajı sonucunda su düzeyinin düşürülmesi tünel stabilitesi açısından olumlu sonuçlar doğuracak olsada oturmalara neden olabilir. Bu oturma paralelinde tünel içerisinde herhangi bir anomali gözlenmeyebilir. Oysa her iki durum tünelin açılması ile oluşmuş olup, tünelde boyutsal sonuç doğurmamaktadır. Problem doğru tanımlanarak yüzeydeki oturmalar ve bunlara bağlı olumsuzluklar tünel içerisinde ve kazı seyri sırasında alınacak ek önlemlerle çözülebilecektir.

JEOLJİK VE JEOTEKNİK DURUM

Araştırma yapılan tüneller ; Süleymaniye formasyonu, bazı literatürlerde ise Güngören formasyonu olarak adlandırılan yeşilimsi gri renkli çok katısert, yüksek plastiseli kil içerisinde açılmaktadır. Yani tamamen zemin ortamı içinde çalışılmaktadır. Süleymaniye kili içerisinde montmorillonit minerali ihtiva etmektedir. Bu mineral killerde aktiviteye ve şişmeye sebep olmaktadır. Dolayısıyla kil, su ile temas ettiğinde şişme potansiyeli göstermekte ve hacimsel artış olmaktadır ve kil zemin içinde tünel açımı sırasında oluşan boşluğa doğru kilin harekete geçmesine neden olmaktadır. Bunun sonucu olarak da tahkimat kabuğuna gelen gerilmeler artmakta, deformasyonlara ve tünel gabarisinde daralmalara sebep olmaktadır.

Yenikapı tünelleri üzerindeki zemin profilinde; en üstte 3.50-4.00m. kalınlığında dolgu zemin tabakası, bu tabakanın altında 2.50-4.00m. arasında değişen siltli, çakıllı kum (alivyon) tabakası mevcuttur. Bu tabaka içerisinde su bulundurduğu ve suya doygun halde olduğundan bir akifer özelliğindedir. Bu tabakanın altında ise 6.00-8.00m. kalınlığında Süleymaniye kili olarak adlandırılan kil tabakası yer almaktadır. Bu kilin içerisinde geometri ve boyutları net olarak bilinmeyen kum merccekleri mevcuttur. Bu kum mercceklerinin üstteki alivyon tabakası ile irtibat yapması durumunda, yakın çevresindeki kilin yapısal özelliklerini değiştirmekte ve kil akıcı hale gelmektedir. Akıcı hale gelen kil tünelin stabilitesinde bozmaktadır.

Bölgede kaçak yapılaşma olduğundan, düzenli bir atıksu ve kanalizasyon sistemi olmayıp fosseptik çukurları ile problem çözülmeye çalışılmış olduğundan alivyon oldukça suya doygundur.

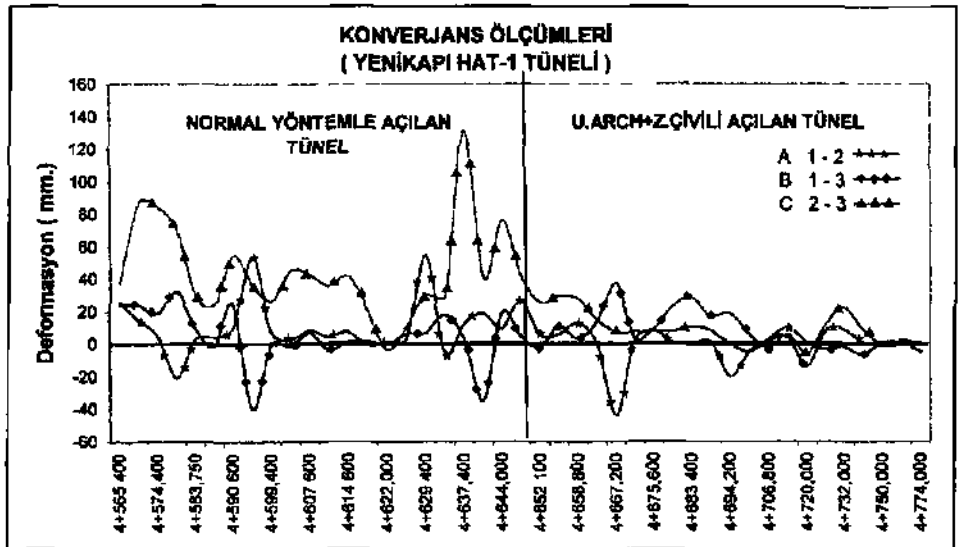
YENİ BİR YÖNTEM ARAYIŞI VE BEKLENTİLER

İstanbul metrosu inşaatı kapsamında 2000 yılı başında Yenikapı Şaftı'ndan başlayan kazılar yaklaşım tüneli ile ana hatlara ulaşarak Unkapanı istikametine devam edilmiştir. Önce H1U aynasının kazısına başlanmış ve üzerinde yapılaşmanın olmadığı bu güzergahta gelişmeler gözlem altına

alındı. Yaklaşık 100 m.tünel kazısı yapıldı ve bu süreç içerisinde yer yer 20-30 cm.'ye varan tünel içi deformasyonlar tesbit edildi. Ayna 4+648.00'e ulaştığında aşırı genlmeler sonucunda tünel kazı aynasında kopma ve kaymalar gözlemlendi. Ayrıca tünel aynasının yaklaşık 15.00m.gerisinde radyal çatlaklar oluştu. Çatlıyan kısımda tünelde 2 tk.iksa ile ek kuşak ringi oluşturulup püskürtme beton atıldı. Uygulanan kazı destekleme yöntemi ile devam edilemeyeceğine karar verilerek ayna kapatıldı.

İlerleme adımları 0.60 m.olup çelik iksalarla desteklenmektedir. Uygulanmakta olan klasik NATM yönteminde her iksanın deformasyon değerleri incelendiğinde oldukça farklı oturmaların olduğu gözlemlenmiştir (Grafik-1). Öndeki iksa ile arkadaki iksaya göre yaklaşık 10 cm.gibi farklı batma ve kapanma değerleri tesbit edildi. Bu durum her iksanın münferit çalışabildiğini, tahkimat kabuğunun yükü homojen yaymadığını ve mevcut tahkimat elemanları ile bunun sağlanamadığı sonucuna varılmıştır. Bu noktadan hareketle enine donatı elamanı kafes iksalara ilave olarak daha dayanıklı ve yükü tahkimat kabuğuna homojen yaymaya yönelik, 1.5" sürgü çubuğu yerine 4" borudan boyuna donatı olarak görev yapacak boruların çakılmasına karar verildi.

İksa ayaklarındaki kapanmaları önlemek için zamanında alınacak tedbirlere (bulon, gergi boruları vs.) ayna destek göbeği engel olmuştur. Hem kapanmaya yönelik önlemlerin alınabilmesi hemde destek göbeğinin fonksiyonunu yerine getirmek üzere tünel istikametine 10°'lik açı ile 130 mm.



Grafik-1 : Boru şemsiye metodu kullanılarak ve kullanılmayan bölümlerdeki koverjans değeri leti

çapında L=12.00m.uzunluğunda delikler açarak içerisine 4"lik ST-3 donatı yerleştirilip, enjeksiyon ile doldurularak sürtünme kolonu gibi görev yapacak zemin çivileri tesis edilebileceği öngörülmüştür.

Gerek şemsiye borularında gerekse aynadaki zemin çivilerinde bindirme tasarlanmıştır. Bu yöntem projelendirilerek bir aynada 15.00m.lik deneme kazısı yaparak yöntemin yeterliliğine karar verilecekti.

BORU ŞEMSIYE (U.ARCH) YÖNTEMİ VE UYGULANMASI

Klasik NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu)'nun kohezyonu düşük zeminlerde uygulanamaması ve deformasyonların yüksek olması üzerine ilk defa İtalya'da U.A.metodu uygulanmaya başlanmıştır.

Bu yöntem sayesinde tünel ve yüzey emniyeti, verimlilik ve ilerleme hızı gibi performans verileri en üst düzeye çıkartabilmektedir. Çeşitli projelerde de yeterliliğini kanıtlayan yöntem İtalya'dan sonra Japonya'da da bir çok tünel projesinde kullanılmıştır.

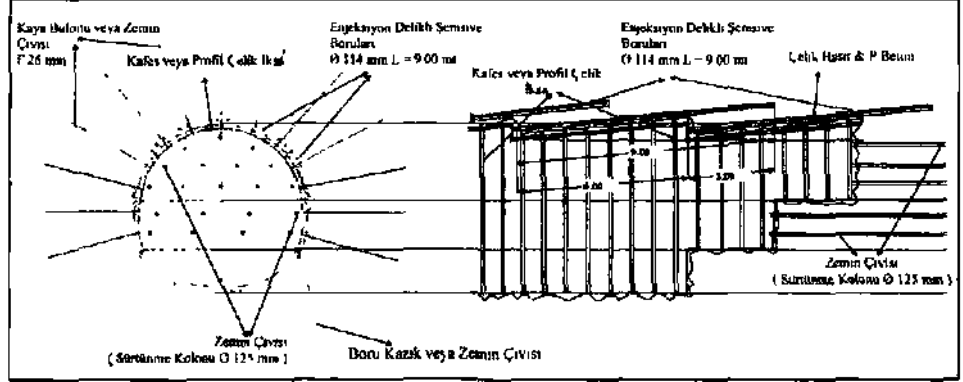
Ülkemizde de ilk olarak, klasik NATM ile yapılan kazılarda , tünel içi deformasyonları ve yüzey oturmaları kabul sınırlarının üzerine çıkması sonucu İstanbul Metrosu Yenikapı Şaftı tünellerinde uygulanmaya başlanmış ve başarıya ulaşmıştır. Bu sonuçlardan sonra Taksim bölgesinde, Fransız Sarayının altından da başarıyla geçilmiştir.

Bu yöntemde borunun tesis edileceği km. kazı proje kesitinin 50 cm. dışında olmalıdır. Bu pay boruların yerleştirilebileceği, deliklerin delinmesi ve makinanın çalışması için gereklidir. Bu pay başlangıçta 3.00m.lik bölümde genişletme kazısı adı altında,genişleyen ve yükselen iksalar monte edilerek 3.00m.nin sonunda elde edilmektedir.

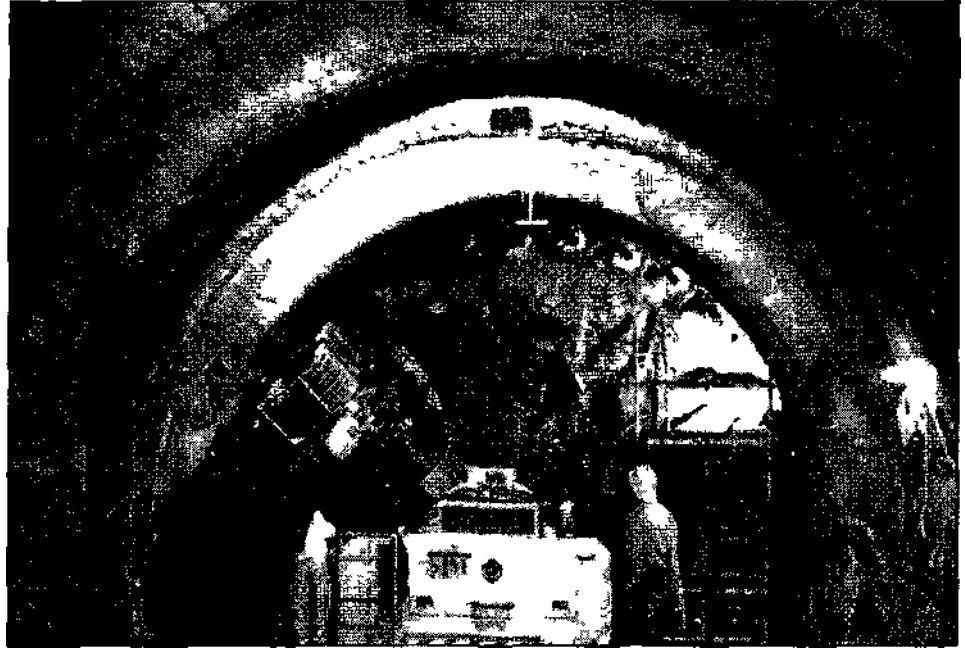
Uygulama ;

Bu aşamadan sonra delik çapı ϕ 130 mm, delik açısı 6° - 8° olacak şekilde açılarak içerisine et kalınlığı $e= 6.3$ mm. boyu $L=9.00$ m.olan 4" borular yerleştirilmek suretiyle sağlanmaktadır. Montajı yapılan Umbrella Arch borularının içine çimento enjeksiyonu ve enjeksiyon dönüş borusu yerleştirilir. Boru ağzı enjeksiyon manşonu ile kapatılır. Boru etrafı alçıyla sıvanır. Boru içinden enjeksiyon vermeye başlanır. Geri dönüş borusundan enjeksiyon gelinceye kadar çimento enjeksiyonuna devam edilir. Bu işlemle hem borunun içerisi hem de boru ile delik arasında kalan boşluk basınçlı çimento şerbeti ile doldurulmuş olur.

Kazı üç aşamada yapılmakta olup ilerleme mesafesi 0.60m.dir. bir periyot da 10 tk.iksa kullanılmaktadır (Şekil-1).



Şekil-1 : Boru şemsiye metodu uygulamasının şematik gösterimi

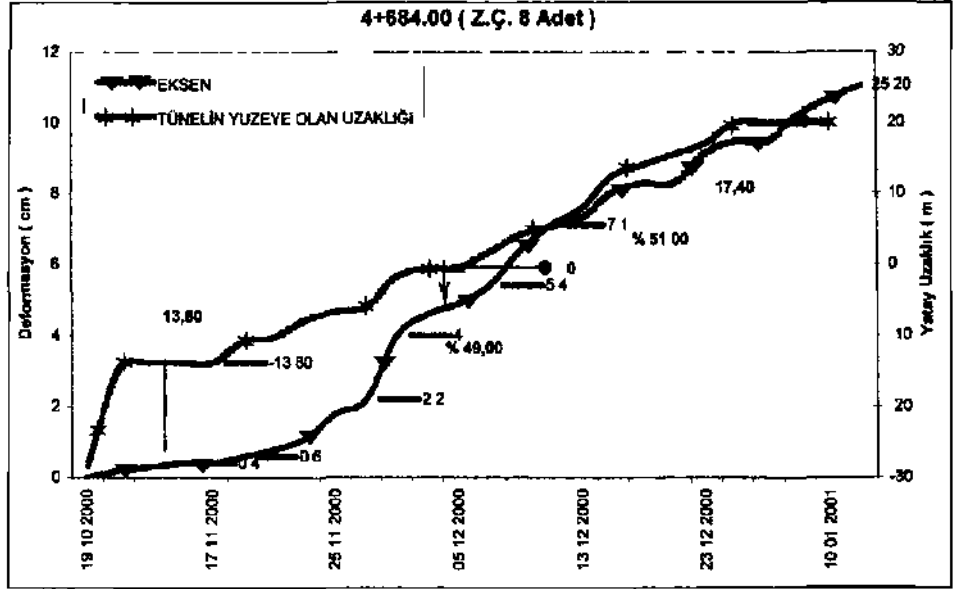


Resim-1 • Umbrella Arch borularının çakılmasından bir görüntü

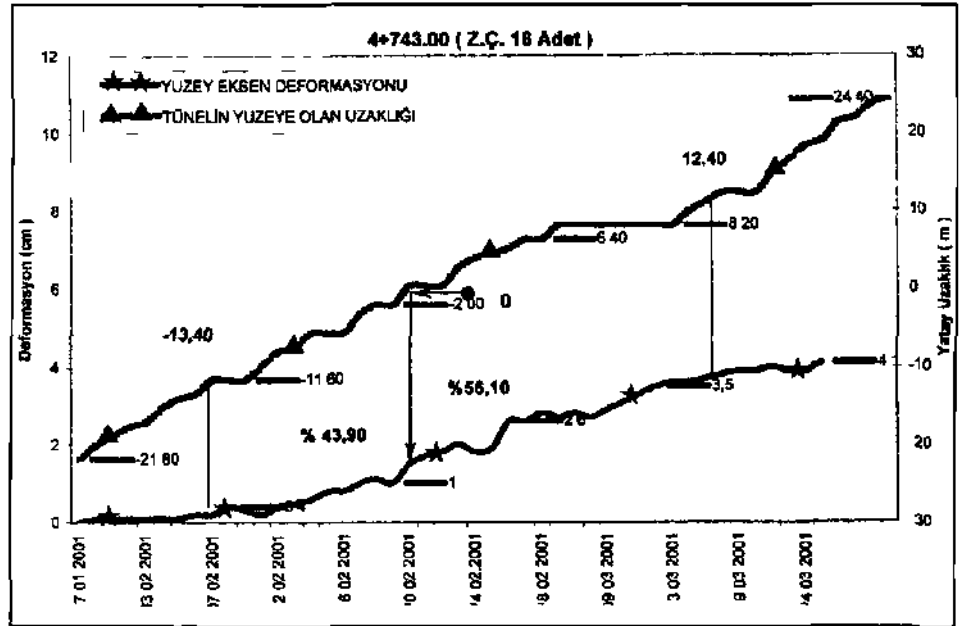
JEOTEKNİK ÖLÇÜMLER VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Boru şemsiye metodunun başlaması ile birlikte deneme çalışması yapılacak 15.00m.lik bölümde olabildiğince fazla veri toplamak için :

1. Yüzeyde her 3.00m.de bir, tünel eksenine, tünelin sol duvarına ve tünelin sağ duvarına denk gelecek şekilde oturma bulonları yerlesMinldi



Grafik-2 : Göbek çivisi sayısına bağlı olak yüzey otu masının seyri

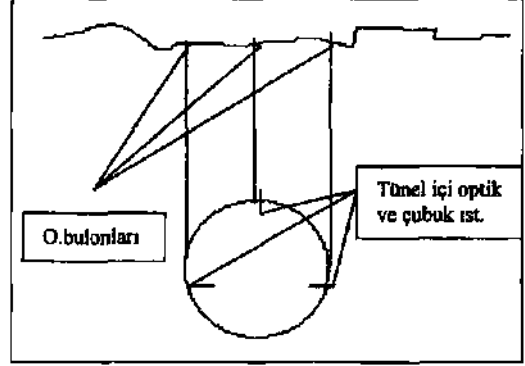


Grafik-3 : Göbek çivisi sayısına bağlı olarak yüzey otu masının seyri

2. Tünel içerisinde her 3.00m. de bir konverjans ölçüm kesitleri tesis edildi, ayrıca optik okumaları yapıldı.

3. Her iksaya kaynatılan demir çubuklarla iksa déformasyonları takibe alındı. Kazı öncesi yerleştirilen ölçüm noktalarından ilk okumalar alındığında " YÜZEY OTURMALARININ " tünel kazı aynasının 12.00-13.00

m. ilerisinde oluştuğu, tünel kazısının ölçüm noktasını 14.00-15.00m. geçinceye kadar devam ettiği tesbit edildi. Gene yüzeydeki oturmalarda % 45'i tünel kazısının yüzeydeki ölçüm noktasının altına gelmeden önce, % 55'i ise tünelin yüzeydeki ölçüm noktasını geçtikten sonra oluşmaktadır (Tablo-1).



ZEMİN ÇİVİSİ (SÜRTÜNME KOLONLARININ) ÖNEMİ

Süleymaniye kili ortamında, çalışılan tünelde yüzey oturmalarının yarısına yakını daha tünel yüzeydeki ölçüm istasyonuna gelmeden önce oluşmaktadır. Bu durumu diğ macunu tüpü örneği ile kıyaslar isek; tüpün ağzı kapalı iken tüp sıkıştığında gözle görülür bir değişiklik olmayacaktır. Ancak tüpün ağzı açık iken sıkıldığında ağızdan çıkan macun hacmi kadar tüpte ezilmeler olacaktır. Tünelde de durum aynıdır. Gelen yüklerden dolayı aynadan plastikleşerek dayanımını yitiren malzeme hacmi kadar yüzeyde oturmalar olacaktır, ki bu çalışılan bölgede 45°'lik bir kayma açısı ile kendini göstermektedir.

Bunu önlemek için tünel aynasındaki zeminin içsel parametrelerini olumlu yönde arttırmak gerekmektedir. Ayna zeminini konsalide etmenin etkili yolunun sürtünme kolonları (Zemin Çivisi) oluşturmak olacağı düşüncesinden hareketle tünel aynasına 12.00m.uzunluğunda 8 Ad.(4m²/Ad.), 12 Ad.(2,7m²/Ad.), 16Ad.(2m²/Ad.), F 130mm. Çapında delikler delinerek içerisine (φ14 mm. ST-3 donatı konup enjeksiyon şerbeti ile doldurulmuştur. 12.00m.boyunda yapılan kolonların 6.00m.si kazıda kullanılmakta ö.00m.sı ise bindirme olarak kalmaktadır.

Tünel aynası ne kadar iyi konsalide edilebilirse kazı öncesi tünel aynasından plastikleşme neticesi malzeme kaybı ve yüzey oturmaları da o kadar az olmaktadır.

Sürtünme kolonu (zemin çivisi) sayısına yada temsil ettiği alanın miktarına göre alınan sonuçlar değerlendirildiğinde:

Tablo -1 : Kazı One esi ve Kazı Soması Yüzey Otrwmalan

Km		Etiklenme Mesafesi (A)	Altodaki Değer (B)	Son Değer (C)	Altındaki Değer % (D)	Son Değer (E)	Zemin ÇMsı	33 Z-Ç/m ³	Yüzey Def	Tünel Def	ORTALAMA DEĞERLER j			
											Ettidenme Mes	Ntımdaki	Son Değer	
4+746	Mes	-14,60	0,00	16,00	26,19%	73,81%	16	2	4,20	1,25				
	Def	0,20	1,10	4,20										
4+743	Mes	13,40	0,00	12,40	43,90%	56,10%	16	2	4,10	1,75	13,00	0,00	14,50	
	Def	0,20	1,00	4,10										
4+737	Mes	5,60	0,00	14,20	29,79%	70,21%	16	2	4,70	3,55				
	Def	0,40	1,40	4,70										
4+734	Mes	15,80	0,00	15,40	50,00%	50,00%	16	2	6,20	3,10	F	G	H	I
	Def	0,40	3,10	6,20										
4+731	Mes	-14,00	0,00	17,20	50,72%	49,28%	16	2	6,90	0,90	0,33	2,52	5,68	*4,28%
	Def	0,30	3,50	6,90										
4+728	Mes	14,60	0,00	11,80	52,50%	47,50%	16	2	8,00	3,00				
	Def	0,50	4,20	8,00										
4+725	Mes	-8,60	0,00	17,80	48,06%	51,94%	12	3	12,90	2,35	-8,60	0,00	17,80	
	Def	4,20	6,20	12,90										
4+722	Mes	-8,60	0,00	17,80	46,73%	53,27%	12	3	10,70	8,80	2,65	5,60	11,80	*7,46%
	Def	1,10	5,00	10,70										
4+699	Mes	-9,60	0,00	14,40	56,07%	43,93%	8	4	10,70	3,85				
	Def	0,40	6,00	10,70										
4+696	Mes	-7,80	0,00	16,20	41,28%	56,72%	8	4	10,90	3,80	-8,94	0,00	16,37	
	Def	0,50	4,50	10,90										
4+693	Mes	-7,20	0,00	20,40	33,02%	66,98%	8	4	10,60	4,80				
	Def	0,10	3,50	10,60										
4+690	Mes	7,80	0,00	11,40	39,18%	60,82%	8	4	9,70	5,70	F	G	H	I
	Def	0,50	3,80	9,70										
4+687	Mes	-4,80	0,00	14,40	45,88%	54,12%	8	4	8,50	2,35				
	Def	1,20	3,90	8,50										
4+684	Mes	-13,80	0,00	17,40	49,00%	51,00%	8	4	10,00	5,60	0,51	4,51	10,04	*4,9594
	Def	0,30	4,90	10,00										
4+681	Mes	11,60	0,00	20,40	50,51%	49,49%	8	4	9,90	2,80				
	Def	0,60	5,00	9,90										

A Oturma başlangıcının tünel aynasına dan uzaklığı ve deformasyon başlangıç değeri

a Tünel yüzeydeki ölçüm noktasının altera gelene kadar oluşan deformasyon değeri

C Yüzeydeki ölçüm noktasındaki deformasyon durduğu zaman tünel aynasına olan mesafesi ve son deformasyon değeri

D Tünel yüzeydeki ölçüm noktasının altına gelene kadar oluşan deformasyon değerinin toplam yüzey deformasyonuna oranı

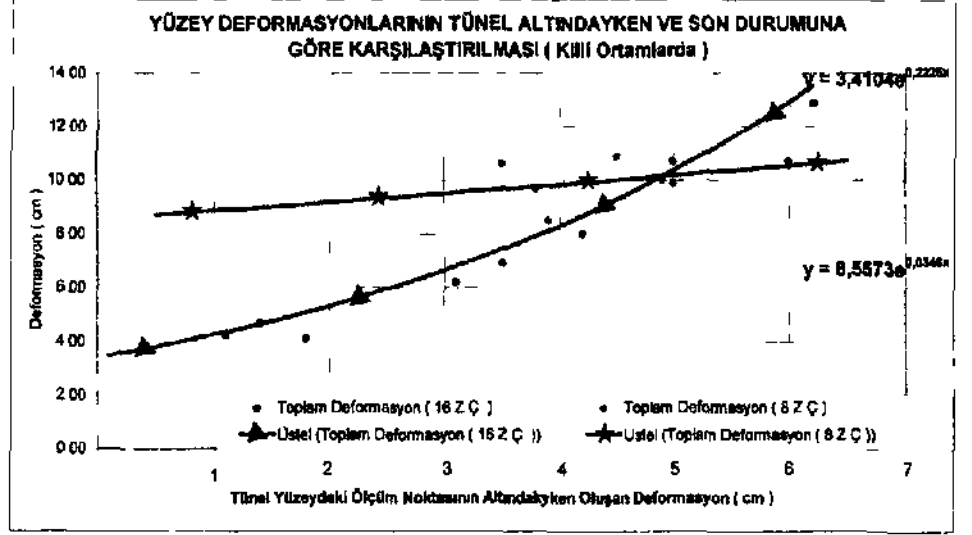
E Tünel yüzeydeki ölçüm noktasını geçtikten sonra oluşan yüzey deformasyonunun toplam deformasyona oranı

F Yüzeydeki ölçüm noktasından alınan ilk değer

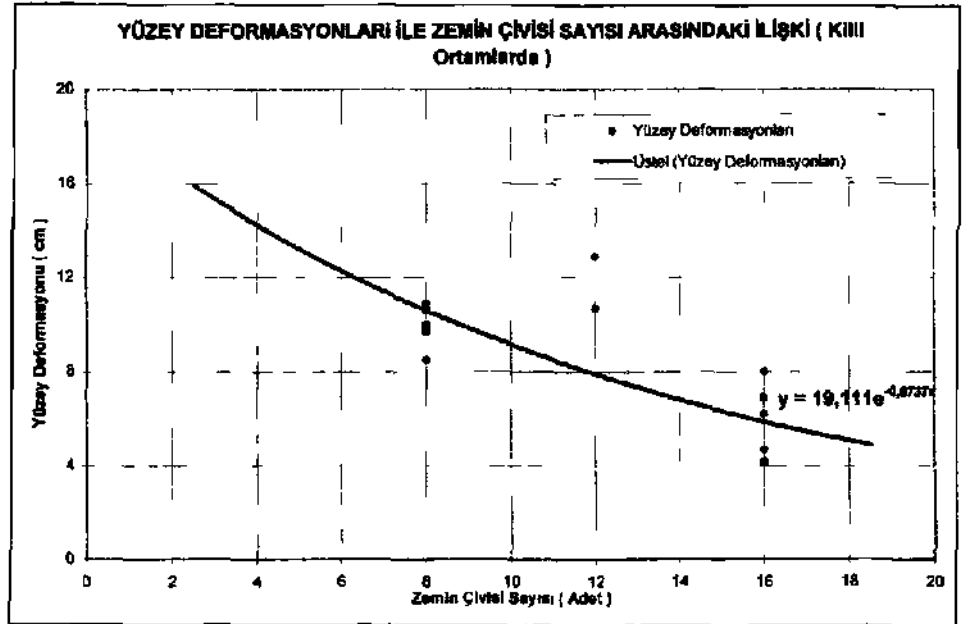
G Tünel yüzeydeki ölçüm noktasının altına gelene kadar oluşan ortalama deformasyon değeri

H Nihai yüzey defarcnasyonunun ortaiama değeri

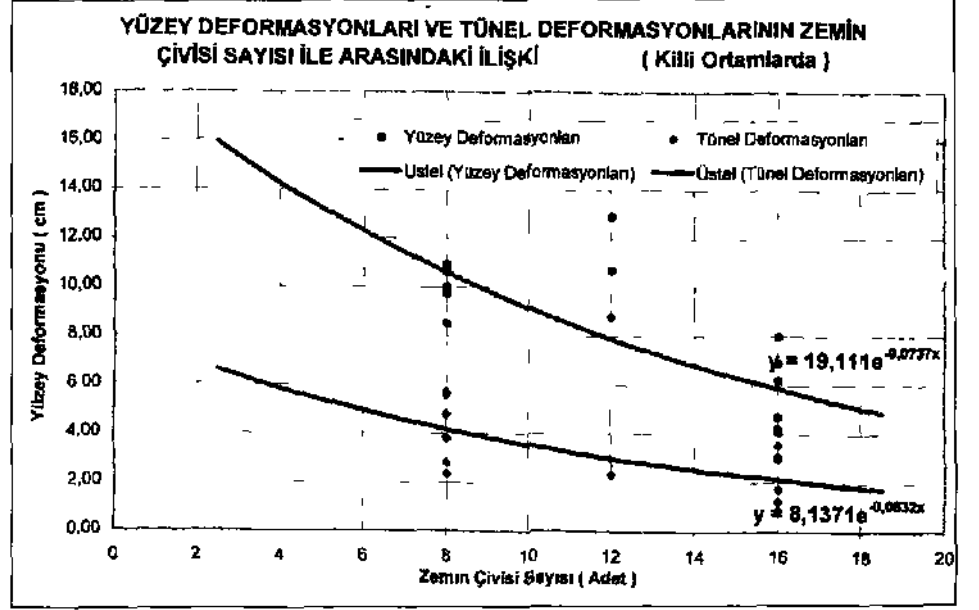
I Tünel yüzeydeki ölçüm noktasının altına gelene kadar oluşan ortalama deformasyon değerinin toplam ortalama yüzey deformasyonuna oranı



Grafik-4 Tünelin yüzeydeki ölçüm istasyonunun altına gelinceye kadar olan yüzey otuması de nihai yüzey otumasının zemin çivisi sayısı de ilişkisi



Grafik-5 Zemin çivisi sayısının nihai yüzey otuması üzerindeki etkisi



Grafik-6: Nihai yüzey oturma ile tünel deformasyonu arasındaki ilişki (Tünel deformasyonu, toplam yüzey oturmasının ortalama % 47'si kadardır)

SÜRTÜNME KOLONLARININ TÜNEL İÇİ DEFORMASYONA ETKİLERİ

Boru şemsiye metodunda kullanılan temel iki destek elemanı vardır:

1. Zemin Çivileri (Sürtünme Kolonları)
2. U.Arch boruları (4" Boru)

Bunlardan birincisi kazı öncesi yüzey oturmalarını ikincisi ise tünel içi deformasyonunu ve nihai yüzey oturmalarını denetleyen elemanlardır. Yapılan ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde tünelin yüzeydeki istasyon noktasının altına gelmeden olan oturmanın nihai oturmayı etkilediği görülmüştür.

Tünel yüzeydeki ölçüm noktasının altına gelene kadar olan yüzey oturması ne kadar fazla olur ise bundan etkilenen ve dinamik yük haline gelen kütle miktarı artmakta ve tünel tahkimatına gelen yükler arttığı içinde tünel içi deformasyonu dolayısıyla nihai yüzey oturmaları tehlikeli boyutlara ulaşabilmektedir.

ŞEMSIYE BORULARININ DEFÖRMASYON ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

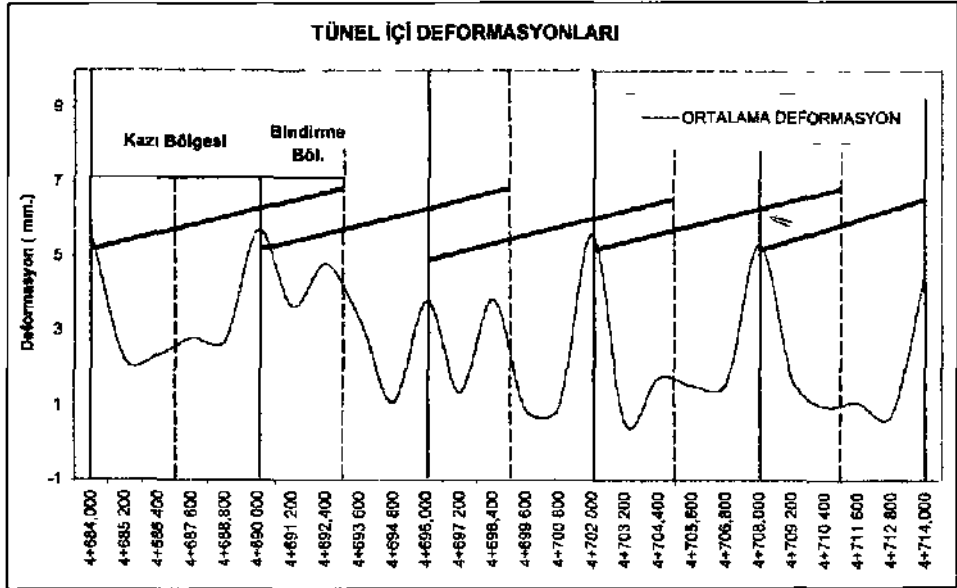
Uygulamanın yapıldığı bölgede tünel aynası çevresine 30 cm. aralıklarla \varnothing 130 mm delik açılarak 114 mm. dış çapında et kalınlığı 6.3mm. olan siyah

çelik borudan toplam 24 Adet (L = 9.00m.) çakılmıştır. Hem borunun içensı hem de boru ile delik arasında kalan boşluk basınçlı çimento şerbeti ile dolurulmuştur.

Şemsiye borularının iki önemli görevi vardır. Birincisi kazı ile tahkimat arasında geçen sürede bir ucu konsalide edilmiş aynaya, bir ucu ıksaya basan kiriş olarak çalışıp üzerine gelen yüklere deformasyona imkan vermeden mukavemet etmesidir. Burada kirişin bir taraf mesneti olan aynanın ne kadar konsalide edilebileceği ayrıca önem kazanmaktadır. İkinci önemli görevi ise tahkimatı bitmiş olan bölgede gelen yükleri tahkimat kabuğuna homojen şekilde yaymaktır.

Tünel içerisinde şemsiye borusu uygulanan bölgelerde radyal çatlamlar gözlenmemiştir. Kazı desteklemesi tamamlanan bölgede tevzi donatısı yönündeki bu şemsiye boruları yükü yaymanın dışında tevzi donatısı gibide çalışarak radyal çatlamların Önüne geçmiştir. Tünel içi deformasyon değerleri ve yerleri izlendiğinde:

L= 9.00m.uzunluğunda şemsiye borusu çakılıp 6.00m.si kazı yapılarak, 3.00m.si de bindirme olarak bırakılmaktadır. Tünel içi deformasyonları düzenli bir şekilde bindirmeli 3.00m.ler de azalıp tek boru olan 3.00m.ler de artan bir ritim izlemektedir. Bu iki değer arasında yaklaşık iki kat dalgalanma olmaktadır. Bu gözlemler çalışmanın yapıldığı ortamda bindirmenin



Grafik-7 Time/içindeki demü çubuk okumaktı ile Umbrella Auh houtlai uun Gostei ilmesi

periyot boyu kadar olmasının tünel deformasyonunu ve nihai yüzey oturmasını denetleyen çok önemli bir faktörü olacağını göstermektedir.

SONUÇLAR

1. Boru şemsiye yöntemi kohezyonu düşük ortamlarda, deformasyonunun düşük olaması istenilen tünel imalatlarında, bina ve yol altı tünel geçişlerinde başarı ile uygulanabilmektedir.
2. Kil ortamında açılan tünelde yüzey oturması tünel içi deformasyondan daha fazladır.
3. Göbek zemin çivilerinin bindirme boylarının belirlenmesinde yüzey oturmasının başladığı nokta ile kazı aynası arasındaki mesafe dikkate alınmalıdır.
4. Göbek zemin çivisi sayısı ile yüzey oturmaları ters orantılıdır.
5. Tünelin yüzeydeki ölçüm istasyonunun altına gelene kadar olan oturma ile nihai oturma , doğru orantılı artmakta veya azalmaktadır.
6. Göbek zemin çivisi uygun sayıda olduğunda, 3 aşamalı kazı yapılan 36m² kesitli tünel, yüzeydeki ölçüm istasyonunun altına 1 cm. yüzey oturması ile girilebilmektedir. Yetersiz ayna kosalidasyonunda bu değer 3-6cm. olmaktadır.
7. Killi ortamda açılan tünellerde yüklerin tahkimat kabuğuna dengeli yayılmasını sağlayacak önlemler alınmalıdır.
8. Çalışılan ortamda şemsiye borularının bindirme boylan yetersiz kalmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre bindirme boyu, kazı boyu kadar olur ise tünel içi deformasyonunun % 50 azalacağı gözükmektedir.
9. Yerleşim birimi altından geçen tünellerde tünele su alınması yüzey oturmalarına neden olabilir.
10. Yerleşim birimi altında açılan tünellerde imalat hızı önemlidir. Tünel kazı aynası yarım günden fazla duracak ise gelecek yüklere karşı desteklenmelidir.
11. Çalışılan bölgede yapılan 3 aşamalı kazıda her kademe arasında en az 2.40m.mesafe olmalıdır.