

İSTANBUL METRO TÜNELLERİNDE OLUŞAN KONVERJANS VE GERİLMELERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ

İbrahim OCAK

İBB, İETT Genel Müdürlüğü, Raylı Sistemler Daire Baş.
Karaköy, İstanbul

ÖZET

Günümüzde, şehir içi ulaşım problemlerinin çözümünde metronun yeri tartışma kabul etmez bir gerçektir. Dünyanın belli başlı büyük şehirlerinde ana ulaşım aracı metrodur. Günümüzde, Londra, New York, Tokyo gibi kentlerin metro ağı 400 kilometrenin üzerinde olup her gün bu metrolarla milyonlarca kişi taşınmaktadır. Metro kazıları sırasında, kazılar çoğunlukla ulaşımın ve şehirleşmenin yoğun olduğu kesimlerde gerçekleştirildiği için oluşan gerilme ve konverjansın önceden tespiti, özellikle yüzeye yakın tünellerde, yüzeyde bulunan binalara zarar verilmemesi açısından gerekli tedbirlerin zamanında alınabilmesi için son derece önemli olmaktadır.

Bu çalışmada, metro tünellerinde oluşan gerilme ve konverjansın kazıdan önce tahmin edilebilmesi amacıyla yönelik olarak, birinci aşaması ulaşıma açılmış, ikinci aşama kazıları devam etmekte olan İstanbul Metrosu, Phases 2D programı kullanılarak modellenmiş ve bulunan gerilme ve konverjans değerleri ölçülen değerlerle karşılaştırılmıştır.

Anahtar sözcükler: Metro kazısı, gerilme, konverjans, İstanbul Metrosu, sonlu elemanlar.

ANALYSIS OF CONVERGENCES AND STRESSES IN ISTANBUL METRO TUNNELS BY THE FINITE ELEMENTS METHOD

ABSTRACT

The role of metro can not be discussible in the solution of urban transportation problems. It is the main transportation vehicle in the biggest cities of the world. Today, the subway network of each metropolis, such as London, New York and Tokyo is more than 400 km in length and daily, millions of people are transported. Subways are excavated mostly in

urbanization and transportation intense areas. In order to prevent hazardous cases, stress and convergence at tunnels should be estimated correctly.

In this study, stress and convergence at subway tunnels of Istanbul metro are aimed to be estimated. The first stage of the system has already been completed while the second stage is still going on. The subways are modeled by Phases 2D program, estimated and measured values are compared.

Key words: Subway excavation, stress and convergence, Istanbul Metro, finite element method.

1. GİRİŞ

Günümüzde, dünya nüfusu hızla artmaya devam etmekte ve bu artışa paralel olarak da bazı şehirlerde plansız ve çarpık kentleşmeler meydana gelmektedir. Bundan dolayı da büyük şehirlerde; trafik, su, çevre kirliliği, plansız yapılaşma, alt yapı, sağlık ve eğitim gibi temel hizmetlerde önemli sorunlar yaşanmaktadır. İstanbul Valiliği ve İBB işbirliği ile İstanbul için yaptırılan bir ankete göre bu sorunlar arasında ilk sırayı % 29' luk bir oranla trafik ve ulaşım sorunu almaktadır [1].

Gelişmiş ülkelerde, ulaşım büyük ölçüde metro ve diğer raylı ulaşım vasıtalarıyla sağlanırken, İstanbul'da, 1875 yılında hizmete giren ve dünyanın 3. metrosu olan 626 metrelik tarihi Karaköy tüneline 1990'lı yıllara kadar bir metro çalışması olmamıştır. Eylül 2000 yılında hizmete açılan yaklaşık 8 kilometrelik İstanbul Metrosu birinci aşaması ise batı kentleriyle karşılaştırılamayacak kadar küçüktür.

Günümüzde İstanbul, yıllık % 4,8 lik nüfus artışı, 10 milyonu aşan nüfusu, kentsel alan genişliğine göre 4800 kişi/km² lik nüfus yoğunluğu (bu oran Türkiye genelinde 78 kişi/km²) ile dünyanın en büyük 23. şehridir. Ülke endüstriyel kuruluşlarının % 38'i, ticari işletmelerinin % 55'i İstanbul'da bulunmaktadır. Ülke vergi gelirlerinin % 40'ının toplandığı İstanbul ülke nüfusunun yaklaşık 1/5'ni barındırmaktadır [2]. Ancak 1000 kişi başına düşen raylı sistem ağı uzunluğu İstanbul'da 3,6 m, New York'ta 31 m, Paris'te 25 m ve Tokyo'da 22 m dir [3].

Yeraltında yapılan kazılar sırasında pek çok problemle karşılaşmaktadır. Bunun bazı nedenleri, kayaçların özelliklerinin tam ve doğru olarak tespit edilememesi, kayaçların kısa mesafelerde büyük değişiklikler gösterebilmesi ve aynı kayacın farklı yerlerde farklı özellikler sergileyebilmesidir.

Metro tüneli kazılarında, oluşan gerilme ve konverjansların büyüklük ve yönünün tespiti ve yerüstü yapılarına en az zararın verilmesi için en küçük tasman ve konverjans oluşumunun temini, üzerinde önemle çalışma gerektiren tasarım parametrelerinden bazılarıdır. Günümüzde bu tür problemlere yaklaşımda, uygulama kolaylığından dolayı giderek artan bir oranda sayısal modelleme yöntemleri kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, Toronto Üniversitesi Kaya Mühendisliği Grubu tarafından geliştirilen Phases 2D programı kullanılarak, metro tünelciliği için hem tespiti hem de limit değerler arasında tutulabilmesi önemli olan konverjans ve tünel çevresinde oluşan gerilmelerin, kazı çalışmaları öncesinde tahmini amaçlanmıştır. Bu amaç için, metro ön çalışmaları sırasında yapılan sondajlardan kayaç özellikleri bilinen 6 adet nokta seçilmiştir. Kayaç özellikleri bilinen bu noktaların özellikleri Phases 2D programına girilmek suretiyle modelleme yapılmıştır. Modelleme sonucunda ulaşılan değerler ölçülen değerlerle karşılaştırılmıştır.

Çalışma sonucunda, modelleme yapılarak saptanan konverjans değerleri ile tünel kazısını gerçekleştiren firmalarca yerinde yapılan konverjans ölçüm değerlerinin karşılaştırılması neticesinde, yerinde ölçülen ve modelleme ile bulunan konverjans değerlerinin birbirine yakın değerler olduğu görülmüştür. Modelleme ile bulunan gerilme değerleri, modellemesi yapılan tünel noktalarında, tünellerde yapılmış her hangi bir gerilme ölçümü olmadığı için gerçek değerlerle karşılaştırılamamıştır.

2. İKİ BOYUTLU SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

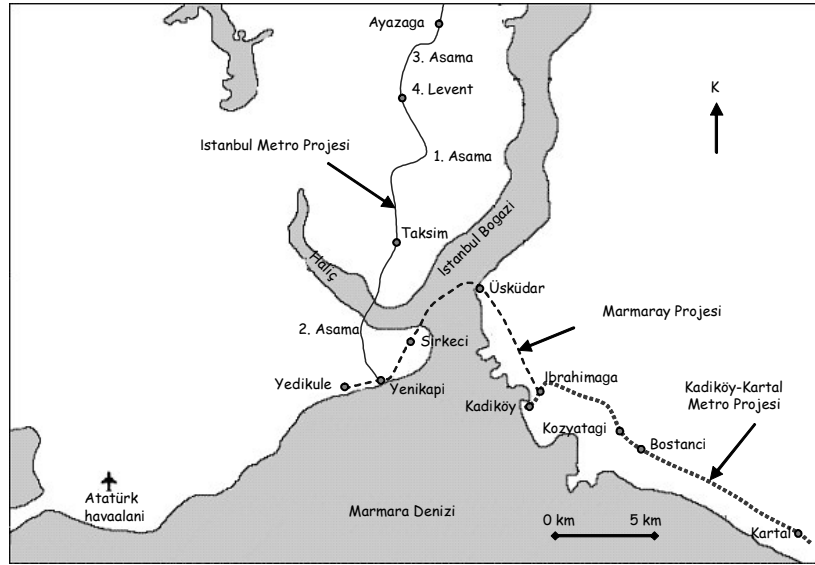
Hrenikoff, 1941 yılında bir düzlem elastik ortamın çubuk ve kirişlerin yan yana getirilmesi veya birleştirilmesiyle temsil edilebileceğini açıklamıştır. 1943 yılında ise Courant, üçgen elemanların birleştirilerek bir elastik ortam davranışının çözülebileceği fikrini ortaya atmıştır. Buradan, sonlu elemanlar yönteminin temelini, yukarıda bahsi geçen iki araştırmacı tarafından 1940'lı yılların başında atıldığı söylenebilir [4]. Yöntem, ilk olarak 1960 yılında, Clough tarafından sonlu elemanlar yöntemi adı altında kullanılmıştır. Sonraki yıllarda, gelişen bilgisayar teknolojisi ile birlikte yöntem pek çok problemi çözmek için farklı mühendislik alanlarında uygulama imkânı bulmuştur. Günümüzde, sonlu elemanlar yöntemiyle ilgili, çeşitli mühendislik alanları ve spesifik uygulamalar için ticari olarak geliştirilmiş çok sayıda program bulunmaktadır [5].

Sonlu elemanlar analiz yönteminde pratik boyutlarda seçilen çalışma alanı bir örgü (ağ) oluşturacak şekilde, iki boyutlu problemlerde genellikle üçgen

veya dörtgen elemanlara bölünmektedir. Bu ağların kesişim noktalarına bağ (düğüm) noktaları denmektedir. Gerilme ve yer değiştirmeler bu bağ noktalarında hesaplanmakta ve sonlu eleman içindeki herhangi bir noktadaki yer değiştirme bağ noktalarındaki yer değiştirmeler ile ilişkilendirilmektedir.

3. ÇALIŞMA BÖLGESİNİN TANITIMI

Bu çalışma, İstanbul Metrosu 1. Aşama 1. Kısım kazılarının yapıldığı Taksim- Şişli arasındaki bölgeyi kapsamaktadır. İstanbul Metrosu, 4. Leventten başlayıp Yenikapı'ya kadar uzanacak olan bir projedir. Projenin 4. Levent-Taksim arasını kapsayan yaklaşık 8 km lik 1. aşaması tamamlanıp Eylül 2000 yılında hizmete açılmıştır. Taksim- Yenikapı arasını kapsayan yaklaşık 5,2 km lik 2. aşama ve 4. Levent-Hacıosman arası 4,5 km lik 3. aşama kazı çalışmaları ise devam etmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. İstanbul Metrosu genel görünüşü.

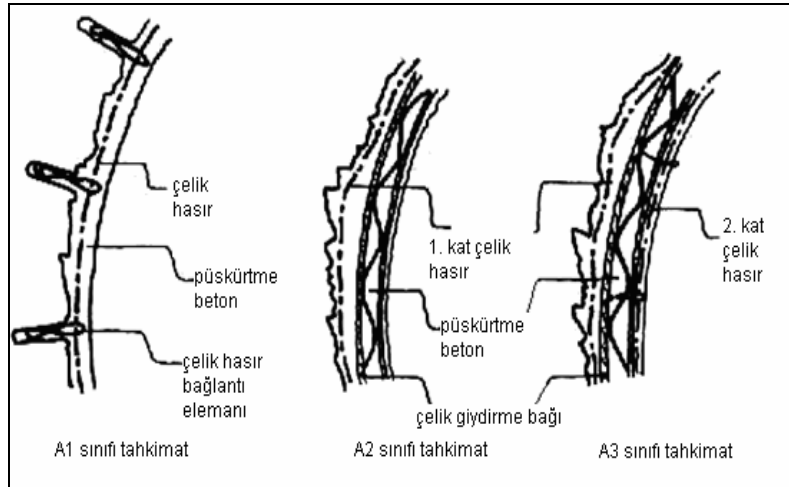
3.1. Kazı ve Tahkimat

İstanbul Metrosu tünel kazıları çoğunlukla, ekskavatör tipi makinelerin kepçesinin çıkarılıp buraya hidrolik bir kırıcı ucun monte edilmesiyle yapılmaktadır. Aç kapa şeklindeki istasyon kazıları ise yüzeyden aşağıya doğru alçalan kademeler halinde ekskavatör ve dozer gibi makinelerle

yapılmaktadır. Kazılan pasa kepçeler tarafından kamyonlara yüklenmekte ve kazı bölgesinden uzaklaştırılmaktadır.

Kazı biçimi tünelin farklı lokasyonlarında farklılıklar göstermekle birlikte, metro için kazılan tünellerin % 90'ını oluşturan A tipi 36 m² kesit alanlı ana hat tünellerinde, önce 28 m² lik üst yarı kazısı yapılmakta daha sonra 8 m² lik alt yarı kazısı yapılmaktadır.

Tünellerde 3 çeşit tahkimat kullanılmaktadır. A1 sınıfı tahkimat, boş alan ve yapılaşma olmayan bölgelerden geçen tünellerde yapılmaktadır. Burada 10-15 cm püskürtme beton ve tek sıra tel kafes kullanılmaktadır. A2 sınıfı tahkimat, yolların altından geçen tünellerdir. Bu tipte 20 cm püskürtme beton, tek sıra çelik hasır ve 1-1,2 metre aralıklı çelik giydirme bağı kullanılmaktadır. A3 sınıfı tahkimat ise binaların altındaki tünellerde yapılmaktadır. Bu tahkimatta 20 cm püskürtme beton, çift sıra çelik hasır ve 0,5-1 metre aralıklı çelik giydirme bağı kullanılmaktadır (Şekil 2) [6]. Çelik hasır ve çelik bağ yerleştirildikten sonra püskürtme beton uygulamasına geçilmekte ve bu işleme çelik hasır ve çelik giydirme bağlar tamamen betonla kaplanıncaya kadar devam edilmektedir. Bu işlemlerden 2 veya 3 gün sonra, püskürtme beton yapılan yere tünelin özelliğine göre 4-8 adet kaya saplaması şaşırtmalı olarak çakılmaktadır. Bu işlemden sonra da 40 cm kalınlığındaki BS 25 sınıfı, 250 kg/cm² tek eksenli basınç dayanımına sahip kaplama betonu yapılmaktadır. Tüneller yüzeyden 20-40 metre derinlikte olup geliş-gidiş tünelleri arası yaklaşık 30-32 metredir [7].



Şekil 2. Tahkimat çeşitleri [6].

3.2. Jeoloji ve Genel Kayaç Özellikleri

İstanbul Metrosu Taksim - 4. Levent güzergâhı, genel olarak, kumtaşı, kıltaşı, çamurtaşı ve siltaşı birimleri ile bunların ardalanmalarından oluşmaktadır [8]. Güzergah boyunca formasyon, 0,5-4 m kalınlığındaki toprak zemin dolgusunun altında ve ileri derecede ayrılmış durumda bulunmaktadır. Tabaka kalınlıkları değişken olmakla birlikte, genelde 5 cm ile 65-70 cm arasında değişmektedir. Kayaçların RQD değerleri % 0 ile % 90 arasında değişmektedir [9]. Sondajlardan ölçülen yer altı su seviyesi 3-12 m dolayında olmasına rağmen tünellerde ancak damlama şeklinde bir su geliri vardır [10]. Çalışma bölgesindeki kayaçların ortalama mekanik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir [11, 12]

4. MODELLEME

4.1. Modelleme Yapılan Noktaların Kayaç Özellikleri

Tablo 1. Çalışma bölgesinin genel kayaç özellikleri [11, 12]

Kayaç türü	Nokta yükleme dayanımı (MPa)	Tek eksenli Basınç dayanımı (MPa)	Dolaylı çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (MPa)	İçsel sürtünme Açısı ($^{\circ}$)	Kohezyon (MPa)
Ayrılmış kumtaşı	7,40	28,70	4,31	10.097,68	49	4,81
Az ayrılmış kumtaşı	8,55	88,39	4,82	22.821,61	48	4,71
Ayrılmış çamurtaşı	1,65	15,20	3,54	8.777,09	-	-
Az ayrılmış çamurtaşı	6,50	33,25	4,94	14.842,60	54	5,30

Altı farklı noktada modelleme yapılmıştır. Bu noktalardan iki tanesi Taksim, iki tanesi Osmanbey ve iki tanesi de Şişli istasyonları civarındadır.

Kullanılan analiz programında modelleme yapılabilmesi için, üzerinde çalışılan noktanın tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü, iç sürtünme açısı, kohezyonu ve yoğunluğu bilinmelidir. Bu nedenle bu altı nokta, daha önce zemin sondajları yapıldığı için program için gerekli olan kayaç özellikleri bilinen noktalardır. Seçilen bu altı noktadaki ortalama nokta yükleme dayanımı, tek eksenli basınç dayanımı, elastisite modülü ve üç eksenli basınç dayanımı Tablo 2’de verilmiştir [13, 14, 15].

Tablo 2. Modelleme yapılan noktaların ortalama kayaç özellikleri [13, 14, 15].

Model no	Nokta yükleme dayanımı (MPa)	Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (MPa)	Üç eksenli basınç dayanımı (MPa)
TS-1	11,77	18,24	2.893,01	150,44
TS-3	9,51	27,66	5.482,00	82,08
OS-1	7,94	25,30	10.787,49	79,44
OS-2	7,85	29,03	11.150,34	93,16
ŞS-1	4,31	30,40	4.069,82	104,15
ŞS-2	6,18	32,07	3.657,94	130,23

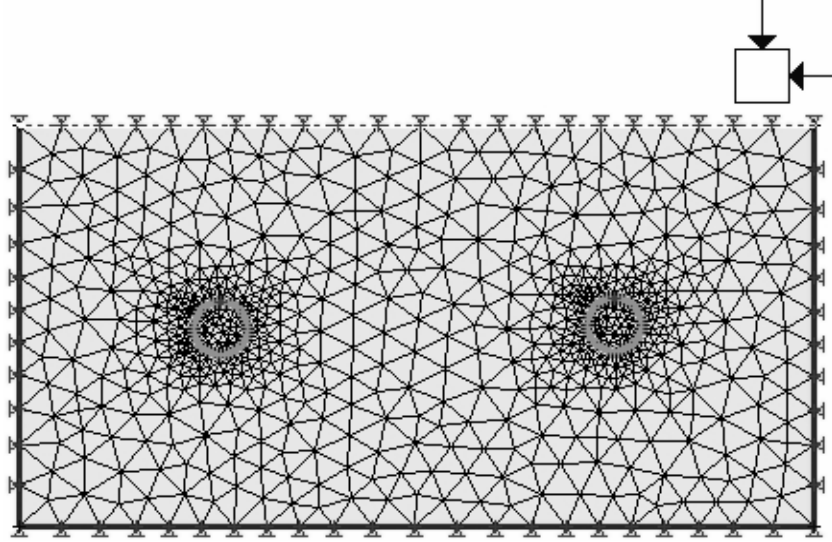
4.2. Kullanılan Analiz Programın Özellikleri

Phases 2D programı, iki boyutta yeraltı açıklıklarının analizi için sınırlı elemanlar ve sonlu elemanlar yönteminin her ikisinin birden kullanıldığı melez bir programdır. Bu program, sınırlı elemanlar yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi veya bu iki yöntemin birlikte kullanılmasını sağlamaktadır. Program, kayacın özelliklerinin büyük kısmının bilindiği durumlarda sonlu elemanlar yöntemini, daha az özelliğın bilindiği durumlarda ise sınırlı elemanlar yöntemini otomatik olarak seçmektedir. Ayrıca program, her türlü kayaçta açılmış yeraltı açıklıklarının analizinde başarı ile kullanılabilir [16].

Phases 2D, Toronto Üniversitesi Kaya Mühendisliği Grubu tarafından geliştirilmiştir. Phases 2D, geometrik düşüncelerle geliştirilmiş otomatik ağ oluşturma özelliğine sahip bir programdır. Bu özellik kullanıcıya seçtiği, analiz edilmesi gereken modellemenin elemanlara ayrılmasında önemli ölçüde zaman ve kolaylık sağlamaktadır.

4.3. Alınan Çıktılar

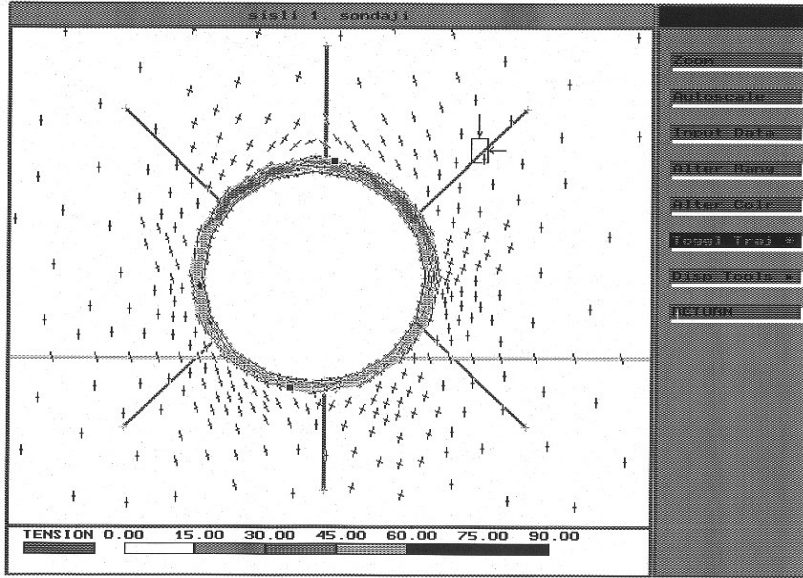
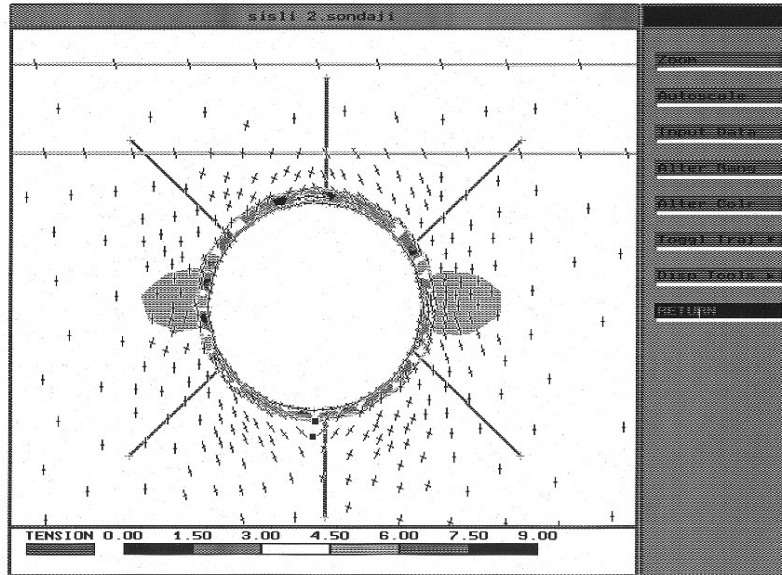
Metronun 1. aşaması hakkında fikir verebilecek şekilde seçilen altı adet noktada modelleme yapılmıştır. Modelleme için veriler programa şu sırayla girilmiştir. Önce tünel kesitleri koordinatları girilmek suretiyle iki boyutlu çizilmiştir. Sonra tünel çevresi sınırlandırılmıştır. Tünel çevresindeki farklı tabakalar ve tahkimat ayrı ayrı programa girilmiştir. Veriler girildikten sonra ağ oluşturulmuştur (Şekil 3).

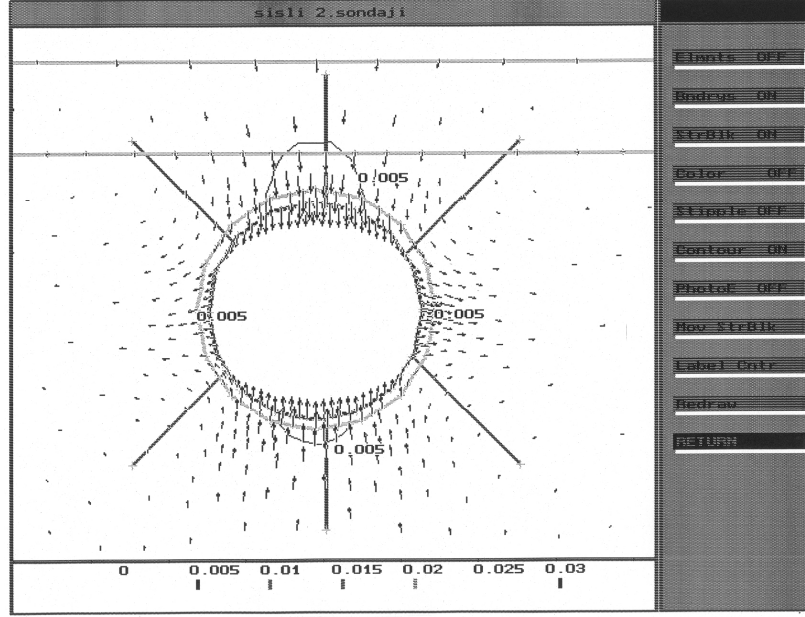


Şekil 3. Ağ oluşturulması.

Programa girilen sınır eleman sayısına göre daha çok veya daha az bağ noktası oluşturulabilmektedir. Program her bir bağ noktası için gerilme ve deformasyonları ayrı ayrı hesaplamakta ve daha sonra bu hesaplamalara göre eğriler halinde gerilme ve konverjans dağılım sonuçlarını verebilmektedir. Ağ oluşturulduktan sonra, daha önce sınırlarla birbirinden ayrılmış kayaç ve tahkimatın özellikleri programa girilmiştir. Veri olarak her bir birim için birim ağırlık, elastisite modülü, poisson oranı çekme dayanımı, kohezyon ve sürtünme açısı girilmiştir.

Veriler girildikten sonra, Phases 2D programının analiz sonucu elde edilmiştir. Phases 2D programı özelliği gereği kayaç ve tahkimata ait bütün datalar eksiksiz girildiği için analiz yöntemi olarak sonlu elemanlar yöntemini otomatik olarak seçmiştir. Çıktı olarak, en büyük asal gerilme (σ_1), en küçük asal gerilme (σ_3) ve konverjans değerlerine ulaşılmıştır. Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da bu çıktılar, büyütülerek tek bir tünel çevresi üzerinde gösterilmiştir. Alınan bu çıktılarda en büyük asal gerilmenin tünelin hemen hemen her tarafında eşit olarak dağıldığı ve maksimum 90 MPa civarında olduğu görülmektedir. En küçük asal gerilmelerin daha çok tünel yanlarında ve maksimum 9 MPa civarında olduğu görülmektedir. Konverjansın ise maksimumu tünel tavanında 6 mm civarında olmak üzere tünel taban ve yanlarında da etkili olduğu görülmektedir.

Şekil 4. En büyük asal gerilmeler (σ_1) (MPa).Şekil 5. En küçük asal gerilmeler (σ_3) (MPa).



Şekil 6. Toplam konverjans ve konverjans vektörleri (m).

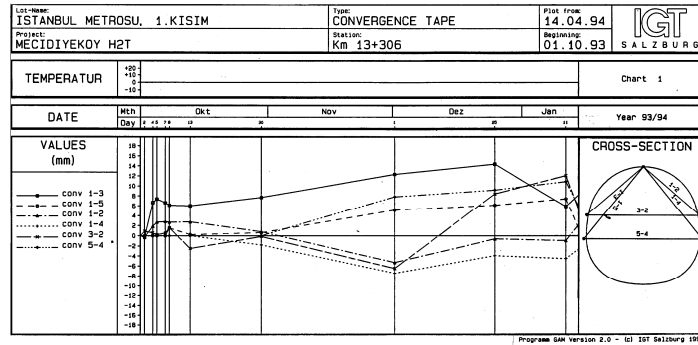
5. SONUÇLAR

Yer bilimlerinde, bilinmeyenlerin çok fazla olması ve kısa mesafelerde bile aynı kayaç kütlelerinin büyük farklılıklar göstermesi bilinen bir gerçektir. Bu nedenle günümüzde yer bilimlerinde, uygulama kolaylığından dolayı sayısal modelleme yöntemleri giderek artan bir oranda kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, metro tünellerinde mühendise başlangıç aşamasında fikir verebilecek gerilme ve deformasyon bilgileri Phases 2D programı kullanılarak tahmin edilmiştir. Bulunan sonuçlar ölçülen değerlerle karşılaştırılmış ve bulunan değerlerin ölçülen gerçek değerlere yakın olduğu görülmüştür. Yapılan model çalışmalarında en küçük asal gerilmelerin tünel yan duvarlarında, en büyük asal gerilmelerin ise hemen hemen tünelin tüm yüzeylerinde eşit olarak dağıldığı görülmektedir. Konverjansın ise maksimumu tünel tavanında olmak üzere tünel taban ve yanlarında da yoğunlaştığı görülmüştür.

Çalışma sonucunda bulunan konverjans değerleri ile kazıyı gerçekleştiren firmalarca yerinde ölçülen konverjans değerleri birbiriyle karşılaştırılmıştır. Model çalışması sonucunda elde edilen konverjans değerlerinin yerinde

ölçülen konverjans değerlerine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Örneğin ŞS2 modelinde hesaplanan maksimum konverjans değeri 6,387 mm dir. ŞS2 modeli İstanbul Metrosu'nun 13305. metresindedir ve bu noktada tünel Ekim ayı başında açılmıştır. Metronun 13306. metresinde yerinde ölçülen ve tünelin açılması ile tünel açıldıktan sonraki yaklaşık 3,5 ayı kapsayan konverjansın en son ölçülen değeri ise yaklaşık olarak 6 mm dir (Şekil 7). Şekil 6 ve Şekil 7 karşılaştırılırsa, maksimum konverjansın her iki şekilde de tavanda ve yan duvarlarda olduğu görülecektir. Yani konverjans açısından, yapılan model ile yerinde ölçülen konverjansın büyüklük ve yönü birbiri ile uyum içerisindedir.



Şekil 7. 13306. metrede yapılan konverjans ölçümü (mm) [17].

Tüm model noktalarına denk gelen konverjans ölçümü olmadığı için bu noktadaki konverjanslar karşılaştırılamamıştır. Ayrıca çalışılan noktalar veya bu noktalara yakın tünellerde yapılmış gerilme ölçümleri olmadığı için modelleme sonucunda bulunan gerilme değerleri ile gerçek değerleri karşılaştırmak da mümkün olmamıştır.

6. KAYNAKLAR

1. İBB, Ulaşım master raporu, http://www.ibb.gov.tr/ibbtr/140/14005/1400501/ulasim_raporu.htm, (2004).
2. İBB, Toplu taşıma sistemi komisyonu raporu (taslak), <http://www.ibb.gov.tr>, (2004).
3. İETT, <http://www.iett.gov.tr/section.php?sid=39#>, (2004).
4. Akdaş, H., Two Dimensional Elasto-Plastic Finite Element Analysis of Longwall Panels in Coal, Colorado School of Mines, PhD. Thesis., (1992).

5. Ocak, İ., İstanbul Metrosunun Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir: 68s., (1995).
6. Sonuç, M., Giray, G., Atik, İ. ve Küçük, S., İstanbul Metrosunda uygulanan yapım çalışmaları, Ulaşımında Yeraltı Kazıları 1. Sempozyumu, İstanbul: 93-104, (1994).
7. Yalçın, A., İstanbul Metro su yapımında 1992–1993 dönemi çalışmaları, İstanbul, 100s., (1994).
8. Ayaydın, N., Metro İstanbul, Tunnel for People, 561-567, Rotterdam, (1997).
9. Bilgin, N., Yeraltı kazılarında mekanizasyon, Ulaşımında Yeraltı Kazıları 1. Sempozyumu, İstanbul, 53-98, (1994)
10. Vardar, M. ve Eriş, İ., İstanbul Metro su Taksim- 4.levent güzergahı temel kayaçların jeomekanik özellikleri ve duraylılık sorunları, Ulaşımında Yeraltı Kazıları 1. Sempozyumu, İstanbul: 181-197, (1994).
11. Biberoglu, S., Kişisel görüşme, İstanbul, (2000).
12. Eriş, İ., Kişisel görüşme, İTÜ Maden Fakültesi, İstanbul (2000).
13. Temel Araştırma ve Sondaj Ltd. Şti., İstanbul Metro su 1. Aşama 2. Kısım İnşaatı Şişli İstasyonu Zemin Etüt Sondajları Factual Raporu, Rapor No: 6/3.512, İstanbul, 46s. (1993).
14. Temel Araştırma ve Sondaj Ltd. Şti., İstanbul Metro su 1. Aşama 2. Kısım İnşaatı Taksim İstasyonu Zemin Etüt Sondajları Factual Raporu, Rapor No: 6/3.512, İstanbul: 52s., (1993).
15. Temel Araştırma ve Sondaj Ltd. Şti., İstanbul Metro su 1. Aşama 2. Kısım İnşaatı Osmanbey İstasyonu Zemin Etüt Sondajları Factual Raporu, Rapor No: 6/3.512, İstanbul: 44s., (1993).
16. Hoek, E., Carvalho, J. L. and Coskum, B. T., Plastic hybrid analysis of steres for estimation of support, University of Toronto: p98., (1992).
17. Palakçı, Y., İstanbul Metro su 1. aşama 1. kısım kontrol mühendisi, Kişisel görüşme, Taksim şantiyesi, İstanbul, (1995).