

YUMUŞAK ZEMİNDE AÇILAN BİR OTOYOL TÜNELİNDE YAŞANAN DURAYLILIK SORUNLARI VE ÇÖZÜMLERİ

STABILITY ISSUES AND SOLUTIONS IN A HIGHWAY TUNNEL DRIVEN IN SOFT GROUND

Timuçin HERGÜL¹

ÖZET

Azerbaycan Karayolları İdaresi sınırları içerisinde devam eden Ahmedbeyli – Fuzuli – Şuşa Otoyolu Projesi T1 tüneli çıkış kesiminde deformasyonlar gelişmiş, yaklaşık 50m'lik bir kesimde her iki tünel tüpünde tavan ve omuz kesimlerinde birincil destek sistemlerinde boyuna ve enine yönde yoğun çatlaklar, çelik kafes iksa destek sistemlerinde bükülmeler ve burulmalar oluşmuştur. Sorun yaşayan sağ ve komşu sol tüplerde imalatlar durdurulmuş, yoğun deformasyonların gerçekleştiği kesimlerin geri doldurulmasını takiben deformasyonlar takibe alınmıştır. Problemlerin teşhisi ve çözümüne yönelik ilave araştırma sondajları yapılmış, imalatlar sırasında oluşturulan jeolojik ayna haritaları, kaya sınıflandırmaları ve deformasyon ölçümleri incelenmiş, idealize jeolojik profil ve olası duraysızlık mekanizması belirlenmiş, tespit edilen birimlerin davranışını temsil etmeye aday dayanım ve deformasyon parametreleri belirlenerek yapının geometrik tasarımına uygun şekilde güvenli bir biçimde taranması ertesi imali için uygulanması kararlaştırılan destek unsurları değerlendirilmiştir. Tünel geçkisinin güvenli bir biçimde tesis edilebilmesi için drenaj tedbirleri alınmış, sorunlu bölgenin taranması ertesi gerekli birincil ve ikincil destek unsurları tasarlanmış, tünel imalatı NATM prensiplerine uygun kazı ve destek unsurları yardımıyla tamamlanmıştır. Drenaj, iyileştirme, kazı ve destek imalatları sırasında tünel içi ve tasman deformasyonları sürekli olarak izlenmiş, değerlerin tasarımda öngörülenlerle uyumlu bir biçimde gerçekleşerek sönümlendiği, sistem kalıcı duraylılıklarının sağlandığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tünel Duraylılığı, Drenaj, Gözlemsel Yöntem, İç Kaplama, NATM

ABSTRACT

Extensive deformations have been experienced during the construction works of T1 tunnel portal section of the Ahmedbeyli - Fuzuli - Shusha Highway Project, within the borders of the Azerbaijan Highway Administration. Longitudinal and transverse cracks have developed

¹ Dr. İnş.Yük.Müh., infra Mühendislik, thergul@infraproje.com.tr (Sorumlu Yazar)



in the primary support system in the roof and shoulder sections at approximately 50-meter section of both tunnel tubes. Construction has been halted immediately on both the right, and the adjacent left tube, and the deformations were measured after backfilling the heavily deformed sections. Additional exploratory drillings have been conducted for the diagnosis and treatment of the problems. Geological face maps, rock classifications, and deformation measurements developed during the construction activities have been examined, and an idealized geological profile and potential instability mechanism have been determined. Strength and deformation parameters representing the behavior of present units have been determined, and the support elements are evaluated required for safe construction. Drainage measures were taken to ensure the safe establishment of the tunnel passage. Required primary and secondary support elements have been designed that shall be applied after scaling the deformed zone, and the tunnel construction was completed with the help of excavation and support elements in accordance with NATM principles. During the drainage, improvement, excavation and support processes, the deformations of the tunnel and subsidence were continuously monitored, and it was confirmed that the values observed matched those anticipated in design, indicating that the system's permanent stability had been achieved.

Keywords: Tunnel Stability, Cave-In, Drainage, Observational Method, Tunnel Lining, NATM

1. GİRİŞ

Ahmedbeyli – Fuzuli – Şuşa Otoyolu T1 tüneline ait kazı ve birincil destekleme imalatları sırasında ve sonrasında sağ ve sol tüpte 275 metrelik aralıkta deformasyonlar gelişmiş, 50 metrelik kesimde ilave olarak tavan ve omuz kesimlerinde birincil destek sisteminde boyuna ve enine yönde yoğun çatlaklar, çelik kafes iksa destek sistemlerinde bükülmeler ve burulmalar oluşmuştur. İmalatların durdurulmasını takiben yoğun deformasyon ve çatlakların oluştuğu bölge geri doldurulmuş ve deformasyonlar takibe alınmıştır. Göçüğün rehabilitasyonuna ve güvenli yol geçkisinin sağlanmasına yönelik ilave araştırma sondajları açılmış, belirginleşen jeolojik kesit ve deformasyon geometrisine uygun destek ve drenaj sistemleri tasarlanarak uygulanmış ve imalat ertesi sistemin performansı gözlenmiştir. İmalatlar sırasında sağ tüpte gözlenen su gelirini takiben iksalarda gözlemlenen burkulmalar Şekil 1'de, tavanda ve sağ omuzda gözlenen eksenel ve verev çatlaklar Şekil 2'de verilmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Deformasyonların sebeplerinin ve olası etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla bir araştırma programı oluşturulmuş ve toplam 1274m uzunluğunda 17 adet araştırma sondajı planlanarak bölgeye ait jeolojik ve geomekanik model incelenmiştir. Yapılan sondajlarda jeolojik yapının uygun olduğu zemin tanımlamasıyla ilerlenen derinliklerde SPT deneyleri yapılmış, örselenmiş ve örselenmemiş numuneler alınarak laboratuvarda indeks ve mekanik dayanım özelliklerinin tespitine yönelik deneyler yapılmıştır. Kaya tanımının hâkim olduğu derinliklerde ise karotlu ilerlenmiş, kuyulardan alınan numunelerden dayanım ve deformasyon özelliklerinin belirlenmesine yönelik tek eksenli basınç ve nokta yükleme deneyleri yapılmıştır. Kuyulardaki ilerlemeler sırasında birimlerin geçirimsizlik özelliklerinin belirlenmesine yönelik basınçlı su testleri yapılmıştır. T1 tüneline incelenen kesimlerde



dayanım ve deformasyon sorunları yaşatan birimler kırmızımsı kahverengi, zayıf-çok zayıf dayanımlı, hidrotermal alterasyonun etkisiyle kısmen-tamamen ayrılmış, killi seviyeler içeren aglomera olarak tanımlanmıştır.



Şekil 1. Sağ tüp sol duvarda iksada gözlenen burkulmalar

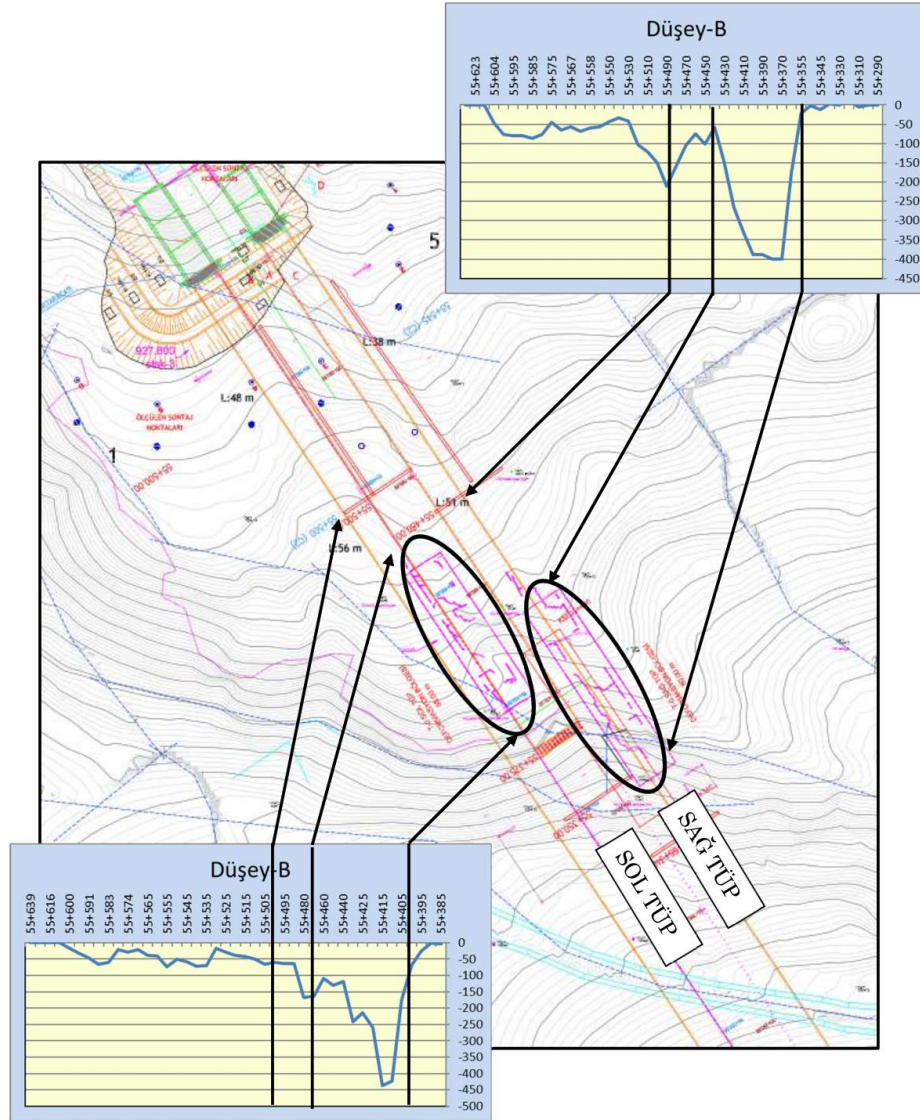


Şekil 2. Sağ tüp tavanda ve sağ omuzda tespit edilen aksenal ve vev yönlü çatlaklar



Değerlendirmelerin yapıldığı tünel çıkışı 275m'lik kesimde aglomera biriminde sağ ve sol tüpte yaklaşık 50m'lik kesimde yoğun deplasmanlar gözlenmiştir. Söz konusu bileşke deplasmanlar sol omuzda 45-50cm, tavanda ve sağ omuzda 30-35cm mertebelerine erişmiş, birincil destek sisteminde boyuna ve enine yönde çatlaklar, çelik iksa destek sistemlerinde bükülmeler oluşmuştur (Şekil.3). Anılan mertebeler projesinde öngörülen deformasyonların çok üzerindedir.

Tavan ve omuzda enine ve veriv yönlü belirgin çatlakların oluştuğu sağ tüpte Aglomera-Kireçtaşı kantağında kazı aşamasında yoğun su ile karşılaşmış, suyun etkisi üç günlük süre içerisinde azalarak sönümlenmiştir. Bu kilometreden sonraki ilerlemelerde deformasyonlarda kayda değer düşüşler yaşanmış, ölçümlerin hedeflenen mertebelere indiği gözlemlenmiştir. İncelenen kesimlerde tespit edilen konverjans ve tünel birincil destek sisteminde görülen yapısal bozukluklar, uygulanan kazı ve destek sistemlerinin gözden geçirilerek yenilenmesine ihtiyaç olduğunu ortaya koymuştur.

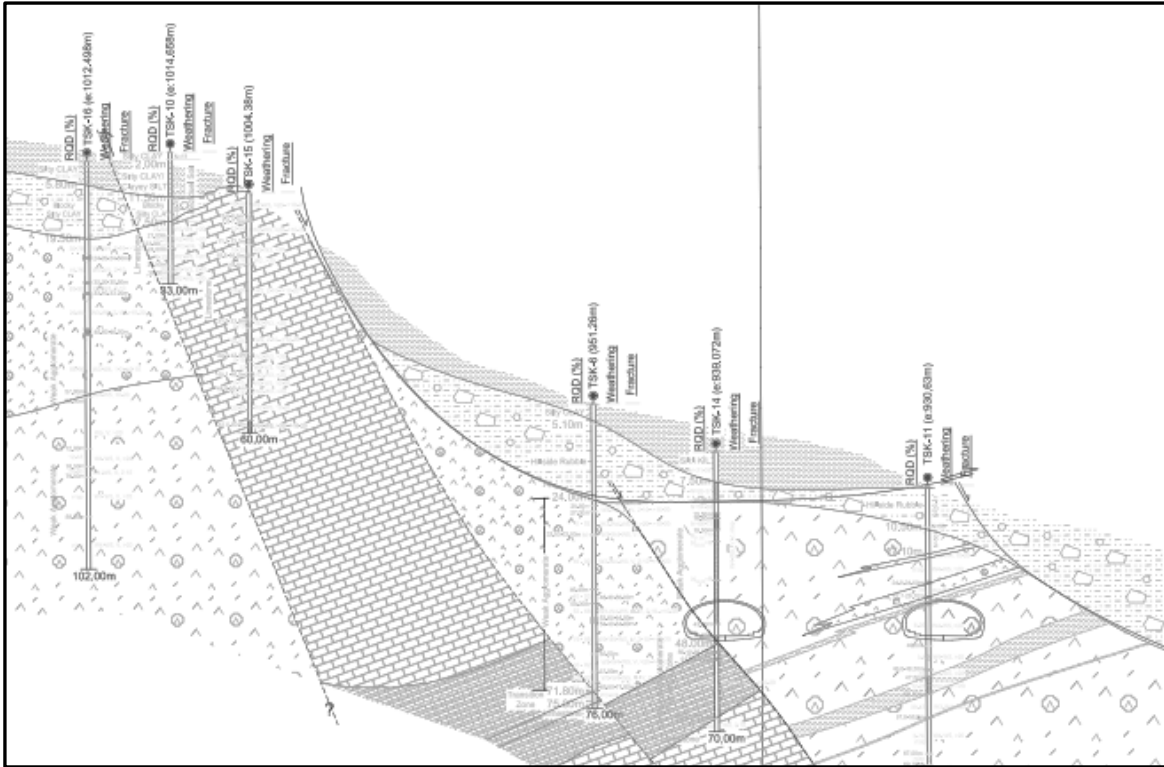


Şekil 3. Tünel çıkış kesiminde tespit edilen çatlak lokasyonları ve deformasyon profilleri



Tünel çıkış bölgesi morfolotektonik yapısı kapsamlı olarak değerlendirilmiştir. Pazarçay-Karasu segmenti içerisinde, büyük boyuna ve enine bölgesel derin ve lokal fayların oluşturduğu bu yapı sondajlarda da gözlenmiş olup, analizlere esas jeolojik kesitlerin belirlenmesine yardımcı olmuştur. İçerisinde kireçtaşı ve aglomera birimleri ile pasif hareketleri ve lokal fayları oluşturan yapıyı tanımlayan kritik idealize jeolojik kesit Şekil 4'te sunulmuştur.

İnceleme alanında özellikle aglomerada benzer litolojik seviyeye ait birimlerde, Geç Eosen ve Erken Miyosen'de başlayan yükselmeler ertesi oluşan ters faylanma etkilerinin yatay ve düşey yönde çok farklı ayrışma, dayanım ve kırık yapılarını oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular çerçevesinde oluşturulan jeolojik modellerde kireçtaşı-aglomera kontağında ve gerisinde konumlandırılan faylar ve tabakalanmalar bölgenin genel jeolojik yapısını destekler niteliktedir. Öte yandan tünel çıkış ağzında gözlemlenen vadi tabanının, tünel eksenini de içine alan aglomera biriminin topuğunda jeolojik oluşum sürecinde yüzey suyu akışı ile oyulmalara yol açarak hareketlere sebebiyet verdiği sonucuna varılmıştır (Şekil.5). Bu durum, bölgede vadiye doğru birbirini izleyen retrogresif hareketlenmelere sebebiyet vererek tünel eksenini üzerinde sekilenmeler oluşturmuştur. Geomekanik bulgular, araştırma sondajları, ayna haritaları ve deformasyon ölçümleri neticesinde incelenen kesimde tespit edilen kaya kütle davranışı Tablo.1'de verilmiştir.



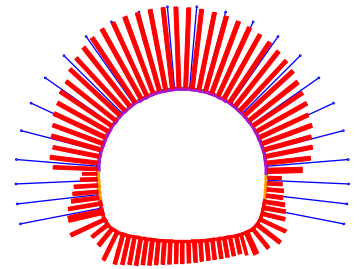
Şekil 4. Tünel çıkış ağzı temsili jeolojik kesiti



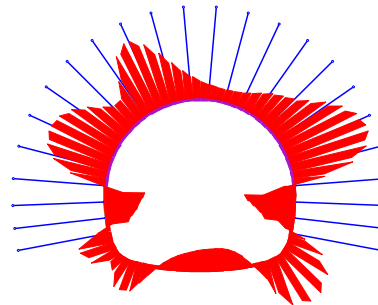
Tablo1. Tünel çıkış ağzında tespit edilen kaya kütle davranışı

Kaya Kütle Tanımı	Kırmızımsı kahverengi, zayıf-çok zayıf dayanımlı Aglomera
Ana Süreksizlik Yönelimleri (Genel)	Kazıdaki ilerlemelerde aynada farklı eğim açısı ve yönlü birden fazla süreksizlik takımı raporlandırılmakla birlikte, birimdeki ayrışma ve bozuşma dereceleri ile kaya kalite puanları tünel içerisinde oluşması muhtemel duraysızlık potansiyellerinin süreksizliklerden çok kütleli özellikler sergileyeceğini ortaya koymaktadır.
Gerilme Koşulları	Mevcut gerilmeler kaya kütle dayanımının üzerinde.
Su Tablası Durumu	Tavan ve omuzlarda damlama, kireçtaşı-aglomera muhtemel fay kontaklarında kısa süreli yoğun su gelişi
Kaya Kütle Davranışı	Kaya kütlelerinde faylanma ve hareketlenmelere bağlı anizotropik yapı gereği tavanda, omuzlarda ve duvarda kazı ertesi ikincil gerilme konsantrasyonları. Zeminleşmiş birimlerin jeomekanik özellikleri gereği su etkisiyle birlikte uzun dönemde plastik deformasyonlar göstermesi ve yoğun baskılı bir ortam yaratması. Ayrışma ve bozuşma dereceleri sonucu birimlerin tamamıyla zeminleşmesi, kütleli bir davranış sergileyerek deformasyon ve zorlanmaları kritik boyutlara ulaştırması.
Uygulanan Kazı Yöntemi	Mekanik Kazı
Deformasyon Karakteristiği	Bazı kesimlerde özellikle duvar ve omuzda oluşan düzensiz deformasyonlar 45-50cm mertebelerinde.
Mevcut Destek Sistemi Davranışı	Özellikle tavan, duvar ve omuzlarda baskılı davranış ve anizotropiye bağlı kazı ertesi gerilme konsantrasyonlarının yarattığı zorlanmalar.

Şematik Kesit
(Zemin özellikleri sergileyen kaya kütle davranışına bağlı püskürtme betonunda ve çelik kafes iksada tavanda, duvar ve omuzlarda oluşan aksel yük ve moment zorlanmaları)

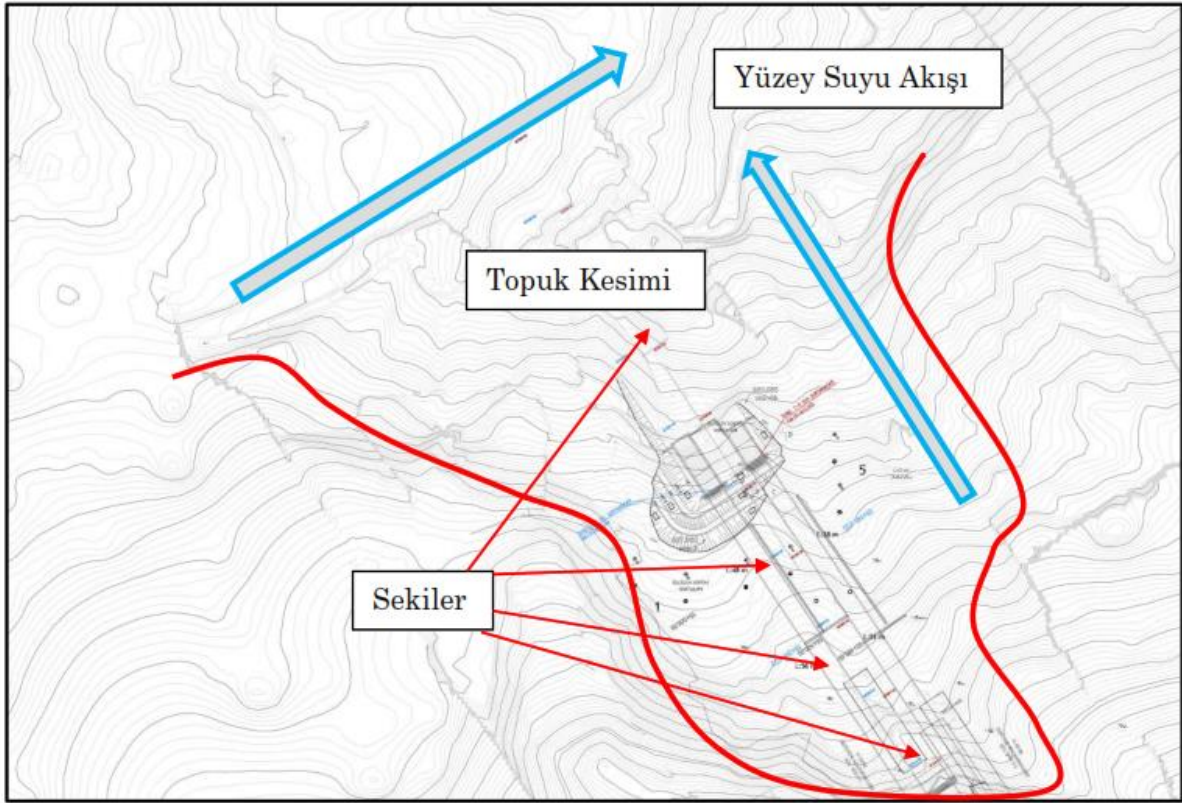


Eksenel Yük



Moment





Şekil 1. Tünel çıkış ağız planı

3. PROBLEMİN ÇÖZÜMÜ

T1 tüneli çıkış kesiminde karşılaşılan deformasyon sorunlarının çözümüne yönelik tarama ve devamında güçlendirilmiş özel tip tahkimattan oluşan bir çözüm projesi geliştirilmiştir. Buna göre izlenen çözüm metodolojisi aşağıda alt başlıklar halinde verilmiştir.

3.1. Destek Sistemleri

Tünel çıkış kesimine ait kazı ve birincil destekleme imalatları sırasında ve sonrasında tavan, omuz ve duvarlarda gelişen deformasyon ve çatlaklar saha gözlemleri ve araştırmaları, jeolojik ayna haritaları, kaya sınıflandırmaları ve deformasyon ölçümleri ile bir arada değerlendirilmiştir. Söz konusu veriler ışığında projesinde tariflenen ve tünel imalatı sırasında kullanılan kazı ve destek unsurlarıyla uyum sağlaması beklenen olası kaya dayanım özelliklerinin bölgede yerleşik birimlerin jeomekanik özelliklerini ve genel davranışa olması muhtemel olumsuz etkilerini tam olarak yansıtmadığı sonucuna varılmıştır. Problemin çözümüne yönelik tarama ve güçlendirilmiş özel tip tahkimat uygulamalarında tünel çevresinde mevcut kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon özelliklerinde gözlemlenen zayıflıklara dikkat edilmediği durumda deplasmanların ve buna bağlı hasarların artarak devam etmesi beklenecektir. Bu sebeple incelenen kesimde tünel yapısının etrafını çevreleyen kaya kütlesi kapsamlı bir biçimde değerlendirilmiş, tünel imalatının projesine uygun ve sağlıklı bir biçimde tamamlanabilmesi için gereken kazı ve destek unsurları



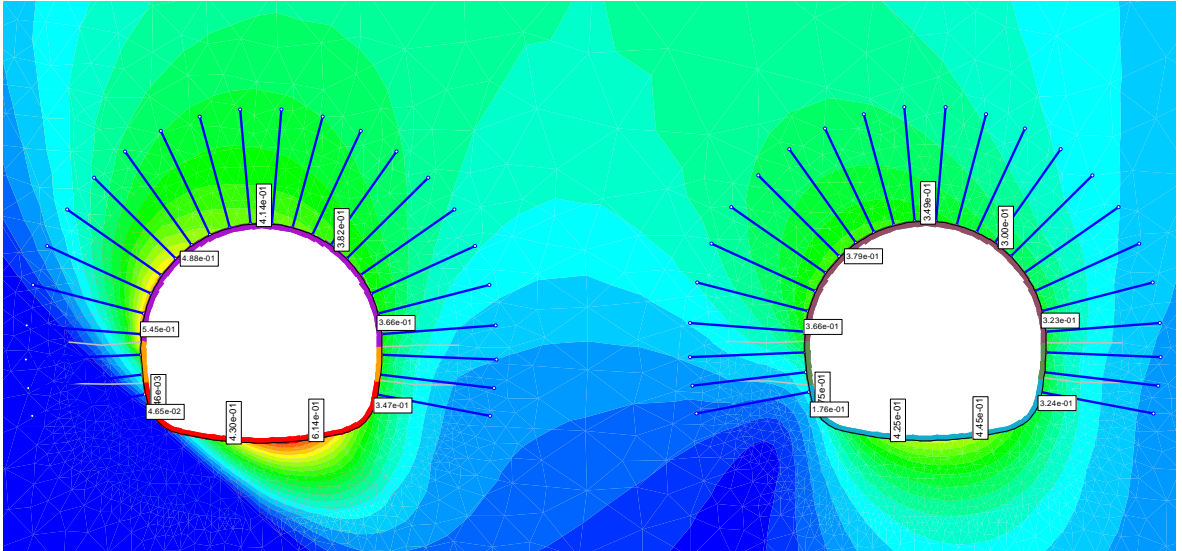
değerlendirilmiştir. Bu amaçla ilgili kesimde tespit edilen tamamen ayrılmış ve zeminleşmiş aglomera birimleri için gerekli bulunan güçlendirilmiş kazı ve destek sistemi analizleri yapılmıştır.

Şemsiye kemeri, hasır çelik, çelik profil ve püskürtme betonu ile kendi delen bulonlardan oluşan birincil destek kaplamasını takiben tam ayna kazıda kazı adımlarını açmaksızın invert betonu dökülerek vakit geçirmeksizin betonarme iç kaplama uygulaması tamamlanmıştır. Uygulamalar zayıf kaya koşulları, stabilite sorunları, yapı boyutu gibi faktörler sebebiyle kısa adımlarda yürütülmüş, invert betonu ve betonarme iç kaplama imalatı ivedilikle tamamlanmıştır.

İmalatlar sırasında sahada tesis edilen sistematik röper noktaları yardımıyla vektörel hareketler periyodik olarak jeodezik yöntemlerle yeterli hassasiyette ölçülmüş, tünel içi rutin geoteknik ölçümler NATM ve gözlemsel yöntem prensipleri dahilinde günlük bazda gereken sıklıkta yapılmıştır (Peck, 1969; Nicholson vd., 1999).

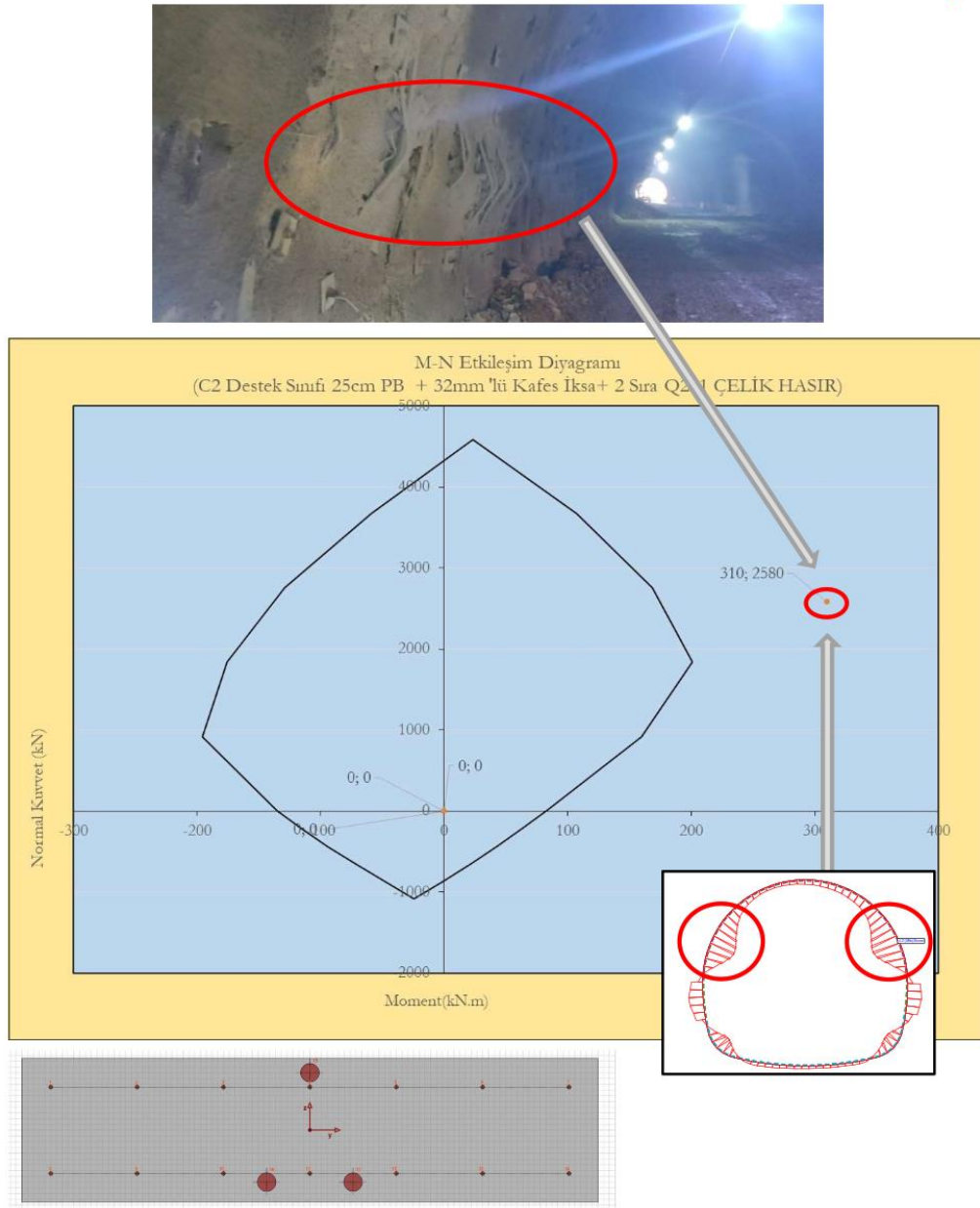
3.2. Destek Sistemi Tasarım Detayları

Püskürtme betonu, çelik kafes iksa ve bulonlarda oluşan deformasyon ve kazı ertesi ikincil gerilme konsantrasyonu kaynaklı sorunların giderilmesi için gereken kazı ve iksa uygulamalarının denetlenmesi ve projelendirilmesi amacıyla sistem fiziksel olarak modellenerek sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla araştırma delgileri ertesi belirginleşen jeolojik yapıya uygun analiz kesitleri oluşturulmuş, gerçekleştirilen kazı aşamaları ve tünel içinde alınan deformasyon ölçümleri yardımıyla duraylılık sorunu yaşayan aglomera birimine ait bünye parametreleri geri analiz yöntemiyle tahmin edilmiştir. Çift tüpte toplam sekiz aşamada gerçekleştirilen kazı ve destek uygulamaları ertesi ölçülen deformasyon davranışına uygun oluşturulan sonlu eleman analiz sonuçları Şekil 6 ve Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 6. Kazı ve destek uygulamaları ertesi geriye dönük analizle tespit edilmiş temsili deformasyon paterni





Şekil 7. Kazı ve destek uygulamaları ertesi püskürtme betonunda oluşan momentler

Birimlere ait dayanım ve deformasyon parametrelerinin geri analiz yöntemiyle belirlenmesini takiben kazı aşamasında uygulanacak destek unsurlarına ait malzeme ve kesit özellikleri belirlenmiştir. Destek unsurlarına ait detaylar Tablo 2'de ve Şekil 8'de verilmiştir. Sahada mevcut problemin boyutu, çevre zemin ve kayanın dayanım ve deformasyon özellikleri gibi faktörler gereği tünel yapısının uzun dönemdeki güvenli yol geçkisi özelliğini betonarme iç kaplama yapısının imalatı ertesi kazanacağı öngörülmüştür. Bu sebeple Tablo 2'de verilen birincil destekleme işlemlerini takiben imal edilecek invertli betonarme iç kaplama yapısı için ilave sayısal analizler yapılmıştır. Analizler sırasında birincil destekleme sisteminin özelliğini yitirdiği, çevre yüklemelerin tamamının betonarme invertli



4. SONUÇLAR

Bu çalışmada Ahmedbeyli – Fuzuli – Şuşa Otoyolu Projesi T1 tüneli çıkış kesiminde oluşan duraylılık sorunları ve çözümleri değerlendirilmiştir. Bu amaçla araştırma sondajları ve inklinometrik ölçümler yapılmış, idealize jeolojik profil ve olası duraysızlık mekanizması belirlenmiş, yapının geometrik tasarımına uygun şekilde güvenli bir biçimde taranması ertesi imali için uygulanması kararlaştırılan birincil ve ikincil destek unsurları belirlenerek uygulanmıştır. Çalışmalar neticesinde aşağıda sıralanan bulgulara ve sonuçlara ulaşılmıştır:

Tünel çıkış kesiminde 275m'lik kesimde aglomera biriminde sağ ve sol tüpte yaklaşık 50m'lik kesimde sol omuzda 45-50cm, tavanda ve sağ omuzda 30-35cm mertebelerine erişen deplasmanların birincil destek sisteminde boyuna ve enine yönde çatlaklar, çelik iksa destek sistemlerinde bükülmeler oluşturduğu görülmüştür. Tavan ve omuzda enine ve verev yönlü belirgin çatlakların olduğu sağ tüpte Aglomera-Kireçtaşı kontağında kazı aşamasında yoğun su ile karşılaşmış, suyun etkisi üç günlük süre içerisinde azalarak sönümlenmiştir.

Duraylılık sorununun sebeplerinin ve olası etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen araştırma çalışmaları sonuçlarına göre çıkış bölgesinin büyük boyuna ve enine bölgesel derin ve lokal fayların oluşturduğu bir yapı içerisinde bulunduğu, ters faylanma etkilerinin yatay ve düşey yönde çok farklı ayrışma, dayanım ve kırık yapılarını oluşturduğu tespit edilmiştir. Tünel çıkış ağzında yerleşik vadi tabanının, tünel eksenini de içine alan aglomera biriminin topuğunda jeolojik oluşum sürecinde yüzey suyu akışı ile oyulmalara yol açarak hareketlere sebebiyet verdiği görülmüştür. Bu şekliyle kaya kütlelerinde faylanma ve hareketlenmelere bağlı anizotropik yapı gereği tavanda, omuzlarda ve duvarda kazı ertesi ikincil gerilme konsantrasyonları olduğu, zeminleşmiş birimlerin geomekanik özellikleri gereği su etkisiyle birlikte uzun dönemde plastik deformasyonlar gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Problemin çözümüne yönelik çözümlere yönelik tarama ve devamında güçlendirilmiş özel tip tahkimattan oluşan bir çözüm projesi geliştirilmiştir. Bu amaçla şemsiye kemeri, hasır çelik, çelik profil ve püskürtme betonundan oluşan birincil destekleme imalatı yapılmış, kazı ve desteklemeler invert betonu ve betonarme iç kaplama uygulaması ile tamamlanmıştır. Drenaj ve tünele ait kazı ve destek imalatları ile çalışma alanı ve çevresi gözlemsel yöntem prensipleri çerçevesinde sürekli olarak takip edilmiş, deformasyonların tasarımda öngörülenlerle uyumlu bir biçimde gerçekleşerek sönümlendiği, sistem kalıcı duraylılıklarının sağlandığı tespit edilmiştir. Projeye ait destek unsurlarının sağlıklı bir biçimde çalıştıklarının tespiti ertesi yol üstyapısı teşkil edilerek tünelin hizmete açılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- AASHTO (2017), LRFD Bridge Design Specifications, 8th Ed., September, 2017.
 Alizadeh, A.A., Guliyev, I.S., Kadirov, F.A., Eppelbaum, L.V. (2016), "Geology of Azerbaijan, Volume.1 : Geology", Springer ISSN 2364-6446.
 Austrian Society for Geomechanics, (2010), "NATM, The Austrian practice of conventional tunneling", ISBN 978-3-200-01989-8



- Hergül. T. (2023), "T1 Tüneli Çıkış Kesimi Duraysızlık Sorunları Geoteknik Değerlendirme Raporu".
- ITA (1988). "Guidelines for the design of tunnels. Tunneling and Underground Space Technology", 3(3): 237~49.
- ITA/AITES (2007), "Settlements induced by tunneling in soft ground". Tunneling and Underground Space Technology, 22(2): 119-49.
- Kolymbas, D. (2008), Tunneling and tunnel mechanics, A rational approach to tunneling, Springer-Verlag Berlin.
- Leca, E., Leblais, Y., Kuhnhehn, K. (2000), "Underground Works In Soils And Soft Rock Tunneling" ISRM, International Symposium, 19-24 November, Melbourne, Australia.
- Maidl, B., Thewes, M., Maidl, U. and Sturge, D.S. (2013), Handbook of Tunnel Engineering, Ernst and Sohn, 1st ed.
- Nicholson, D, Tse, C and Penny, C. (1999), "The Observational Method in ground engineering – principles and applications", Report 185, CIRIA, London.
- Peck, B.B. (1969) "Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics," 9th Rankine Lecture, Geotechnique, 19, No.2.pp.171-187.

