

DÖRT ŞERİTLİ BİR OTOYOL TÜNELİNDE OLUŞAN GÖÇÜĞÜN İYİLEŞTİRİLMESİ – VAKA ANALİZİ

MITIGATION OF A CAVE-IN OCCURED AT A FOUR LANE MOTORWAY TUNNEL – A CASE HISTORY

Timuçin HERGÜL¹, Şenda SARIALIOĞLU²

ÖZET

Karayolları 1. Bölge Müdürlüğü sınırları içinde yer alan Kuzey Marmara Otoyolu Projesi Kurtköy-Akyazı Kesiminde T5 tüneli çıkış portaline yakın sağ tüpte yaklaşık 50m'lik kesimde bir duraylılık sorunu yaşanmıştır. Sorun yaşayan sağ ve komşu sol tüplerde imalatlar derhal durdurulmuş, pasanın püskürtme betonu ile kaplanmasını takiben deformasyonlar takibe alınmıştır. Problemlerin teşhisi ve çözümüne yönelik ilave araştırma sondajları ve inklinometrik ölçümler yapılmış, idealize jeolojik profil ve olası göçük mekanizması belirlenmiş, iyileştirme, destek ve drenaj unsurlarından oluşan bir proje geliştirilerek uygulanmıştır. Tünel geçişinin güvenli bir biçimde tesis edilebilmesi için derin drenaj tedbirleri alınmış, sorunlu bölge tünel üstü enjeksiyon uygulaması ile iyileştirilmiş, 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 Göçüğü, Drenaj, Gözlemsel Yöntem, Enjeksiyon, NATM

ABSTRACT

A stability problem has occurred in approximately 50m section of right tube close to the T5 tunnel exit section in the Kurtköy - Akyazı Section of Northern Marmara Motorway within the borders of 1st Regional Directorate of Highways. Construction was stopped immediately on both the right, and the adjacent left tube, and the deformations were measured after covering the waste face with shotcrete. Additional exploratory drillings and inclinometric measurements were made for the diagnosis and treatment of the problems, the idealized geological profile and collapse mechanism were determined, and a project consisting of improvement, support and drainage elements was developed and implemented. Deep drainage measures were taken to establish the tunnel passage safely,

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

² İnş.Yük.Müh. Karayolları Genel Müdürlüğü, KMO Kontrollük Teşkilatı, İSTANBUL

the problematic area was improved with the application of injection above the tunnel, 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 productions, the deformations of the tunnel and subsidence were continuously monitored, and it was determined that they were damped in accordance with the ones envisaged in the design, and the permanent stability of the system was ensured.

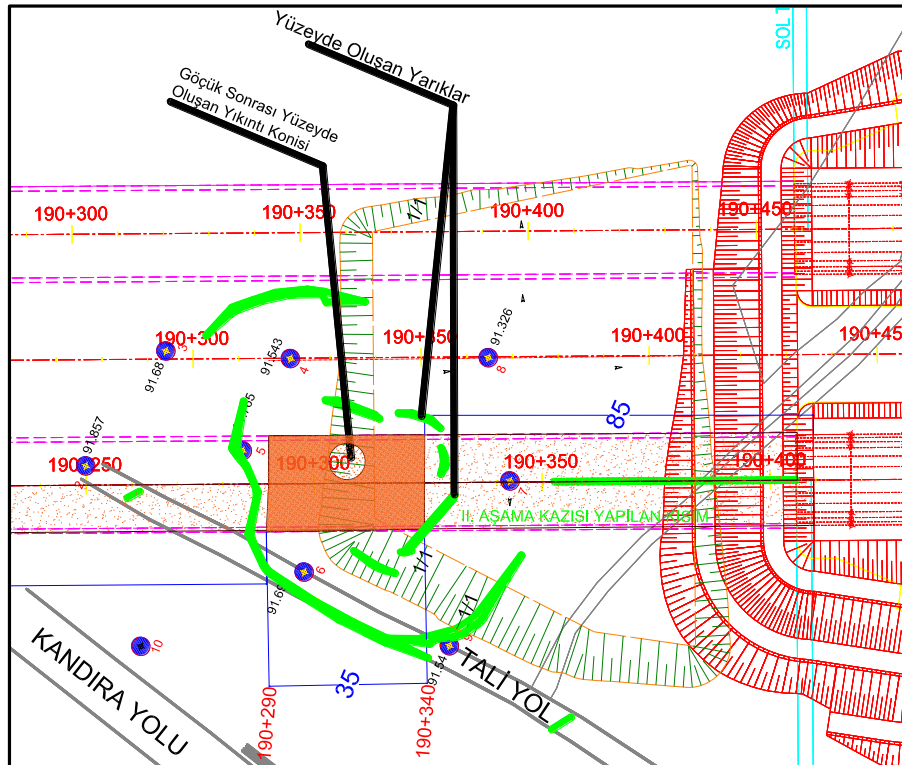
Keywords: Tunnel Cave-In, Drainage, Observational Method, NATM

1. GİRİŞ

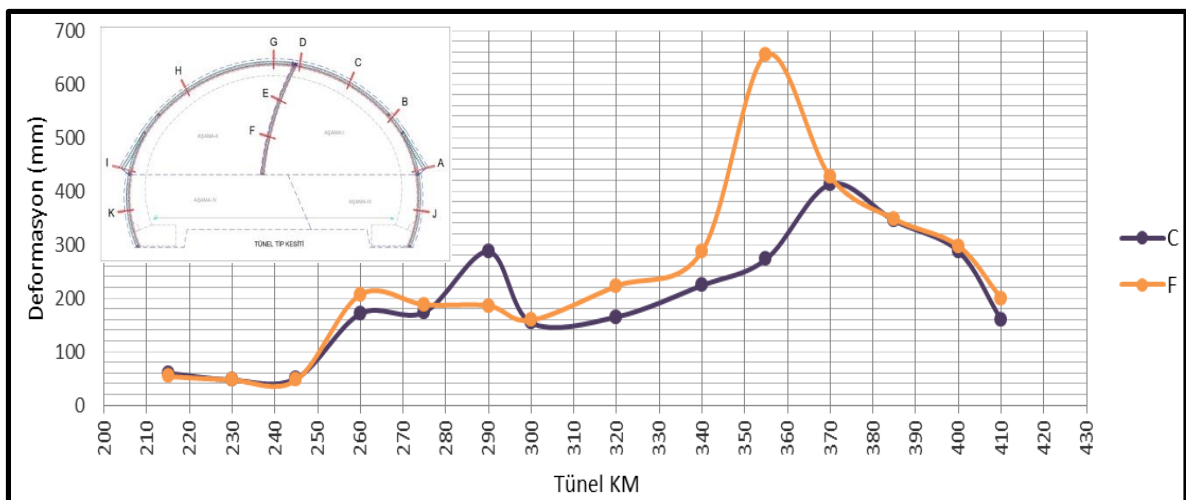
Kuzey Marmara Otoyolu Projesi, Kurtköy-Akyazı Kesiminde Belenyolu Tepesi ve Bayramyolu Sırtı olarak adlandırılan bölgede projelendirilen T5 tüneli Güneydoğu tüpü çıkış portalına yakın kazı ve destekleme ilerlemeleri sırasında yaklaşık 50 metre uzunluğunda bir göçük meydana gelmiş, yüzeyde izdüşümü olan noktada bir yıkıntı konisi oluşmuştur. Bu kesimde hem Güneydoğu hem de komşu Kuzeydoğu tüpünde imalatlar derhal durdurulmuş, pasanın püskürtme betonu ile kaplanmasını takiben deformasyonlar takibe alınmıştır. Göçüğün rehabilitasyonuna ve güvenli yol geçişinin sağlanmasına yönelik ilave araştırma sondajları açılmış, inklinometrik ölçümler yapılmış, belirginleşen jeolojik kesit ve göçük geometrisine uygun destek ve drenaj sistemleri tasarlanarak uygulanmış ve imalat ertesi sistemin performansı gözlenmiştir. İmalatlar sırasında Güneydoğu tüpü sağ omuz bölgesinde su gelirini takiben baskı ve zorlanmayla birlikte oluşan göçük bölgesi ayna görüntüsü Şekil 1’de, plankotesi Şekil 2’de, göçük öncesi kaydedilen deformasyonlar Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 1. T5 tüneli çıkış portal kesimi göçük bölgesi aynası



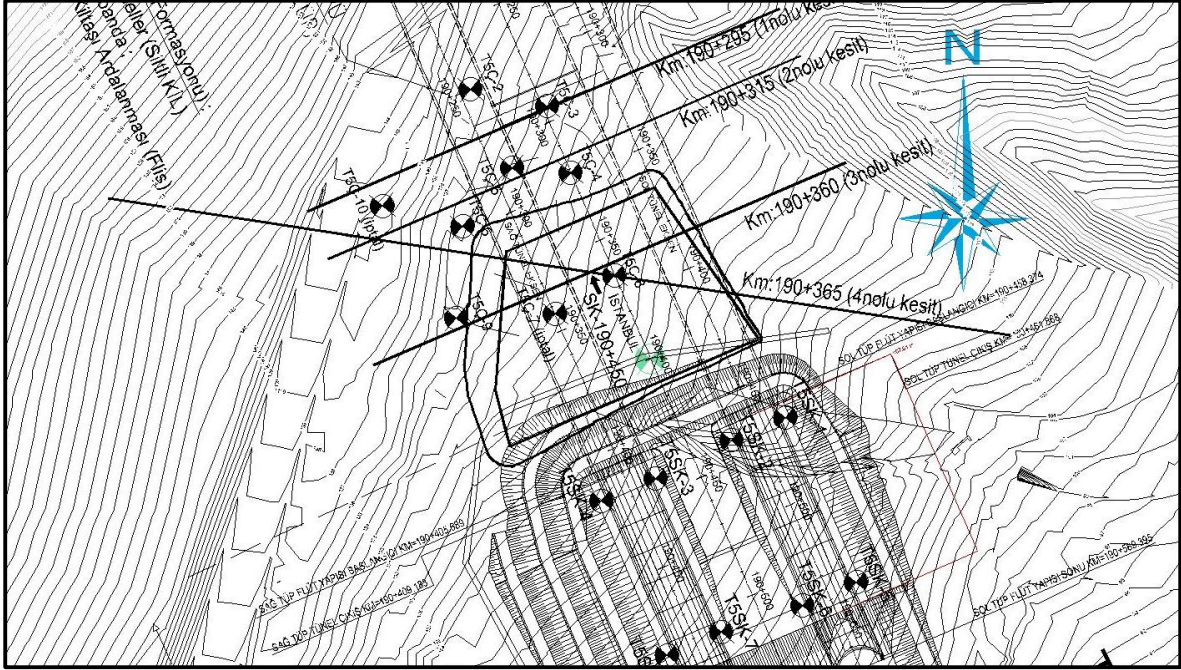
Şekil 2.GD tüpü çıkış kesimi problemlili kesim plankotesi



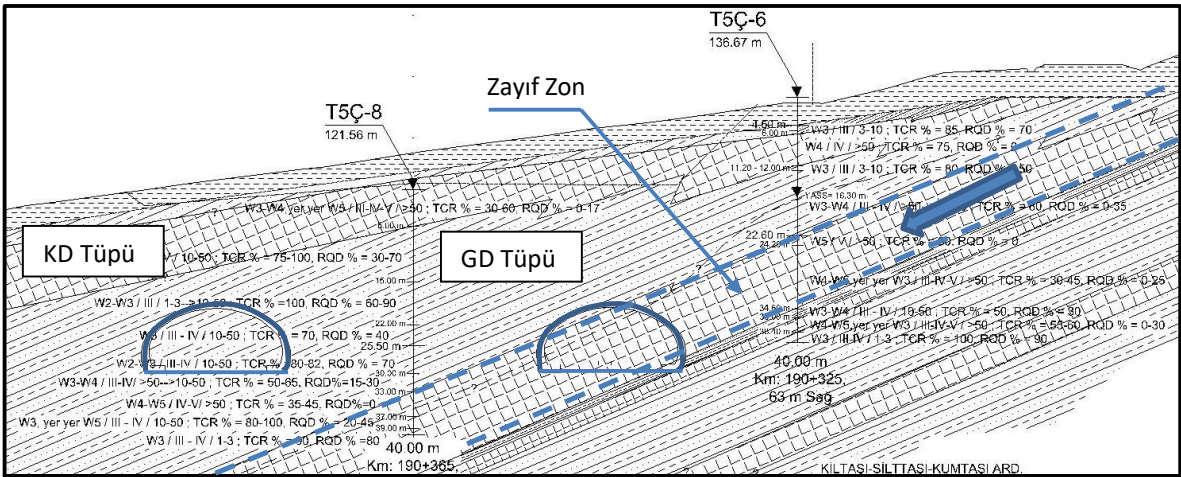
Şekil 3. GD tüpü çıkış kesiminde tünel profili boyunca göçük öncesi oluşan deformasyonlar

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Göçüğün sebeplerinin ve olası etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla bir araştırma programı oluşturulmuş ve toplam 10 adet araştırma sondajı planlanarak göçük bölgesine ait jeolojik ve geomekanik model incelenmiştir. Kuyulara ayrıca inklinometre boruları yerleştirilmiş, hareketlerin muhtemel devamlılığı da takibe alınmıştır. Problemin çözümüne yönelik oluşturulan kesitlerin ve sondajların gösterildiği plan Şekil 4'te, bu bilgiler doğrultusunda oluşturulan kritik idealize jeolojik kesit Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 4. GD tüpü çıkış kesimi problemli kesim sondaj yerleri plankotesi



Şekil 5. GD tüpü çıkış kesimi problemli kesim 4 Nolu. Kesit (Anayol Eksen 190+365)

Jeolojik kesitten de görüldüğü üzere, göçüğün tetiklendiği ve su gelirlerinin gözlemlendiği GD tüpünde sağ omuz kesiminde Kilitli – Siltli – Kumtaşı birimlerine ait bir tabakanın suyun varlığı ile aşırı ayrılarak bozuşmuş olduğu ve bu sebeple de tünel imali sırasında ilave bir baskı ve duraysızlık unsuru olarak ortaya çıktığını göstermiştir. Araştırma sondajları ışığında oluşturulan jeolojik kesitler, aşırı ayrılarak bozuşmuş ve W4-W5 olarak tanımlanan bölgenin göçüğün başlangıcında tünel tavanının üstünde seyrettiğini, göçüğün orta kesimi olan Km:190+315'te ise tünel tüpünün sağ omuzunu doğrudan tehdit ettiğini göstermiştir. Ortalama 20-25° eğimde yerleşik birimin problemin sonlandığı Km:190+360'larda etkisini azalttığı, daha sonraki kesimlerde ise GD tüpünün alt kotlarına yerleşerek etkisini yitirdiği görülmüştür. Problemin asli unsuru olarak ortaya çıkan zayıf bölge, tünel eksenine vererek tabii topoğrafya eğimine uygun alınan 4 Nolu kesitte (Şekil 5), belirgin bir şekilde görülmüştür.

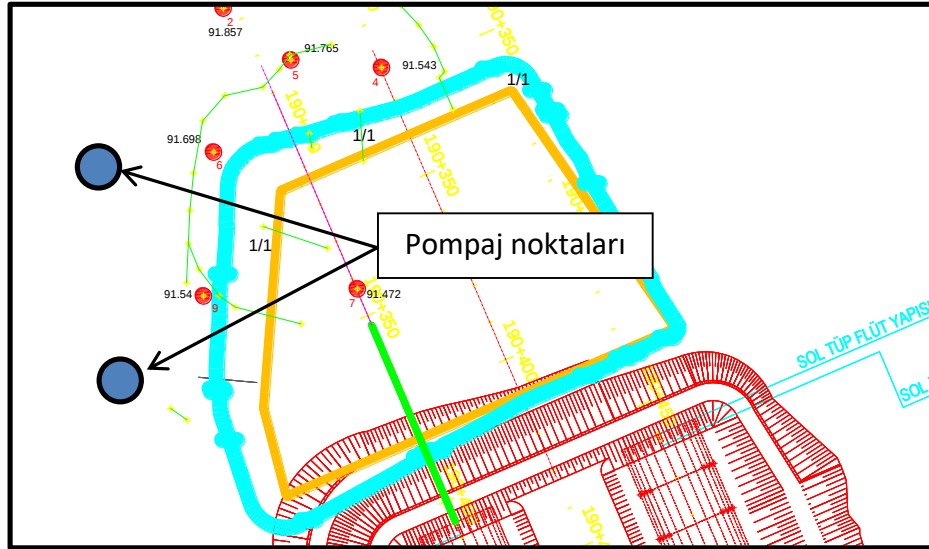
Proje aşamasında tespiti mümkün olmayan zafiyet bölgesinin yarattığı göçük literatürle uyumlu bir biçimde düşük örtü kalınlığı altında kohezyonlu zeminlerde oluşması muhtemel göçük mekanizmasına uygun bir biçimde gerçekleşmiş (Leca vd., 2000; ITA/AITES, 2007) göçüğün tabii topoğrafyaya yansıyan gerilme çatlakları sağ tüp ekseninden 40 metre uzaklıklara ulaşmıştır. Bu şekliyle sağ tüp üzerinde eksene dik 80 metrelik, eksene paralel 50 metrelik bir kesimin göçükten doğrudan etkilendiği sonucuna varılmıştır.

3. PROBLEMİN ÇÖZÜMÜ

T5 tüneli Güneydoğu Tüpü çıkış kesiminde karşılaşılan göçük probleminin çözümüne yönelik drenaj, iyileştirme ve güçlendirilmiş özel tip tahkimattan oluşan aşamalı bir çözüm projesi geliştirilmiştir. Buna göre izlenilen çözüm metodolojisi aşağıda alt başlıklar halinde verilmiştir.

3.1. Drenaj Tedbirleri

Öncelikli olarak Kandıra Yolu tarafında ve gerilme çatlaklarının gerisinde proje tünel taban kotlarının 5-10m altına inecek şekilde derin kuyu sondajları yapılarak özellikle yağışlı sezon ertesi oluşan ve sağ omuzda ayrılmış kilaşı zonundan gelen suların kurutulması planlanmıştır (Şekil 6). Bu şekilde kilaşının progresif dekompozisyonun ve boşluk suyu basıncı artışlarına bağlı mekanik dayanım kayıplarının oluşmasının engellenmesi, imalatlar sırasındaki su gelirine bağlı güçlüklerin bertaraf edilmesi hedeflenmiştir.

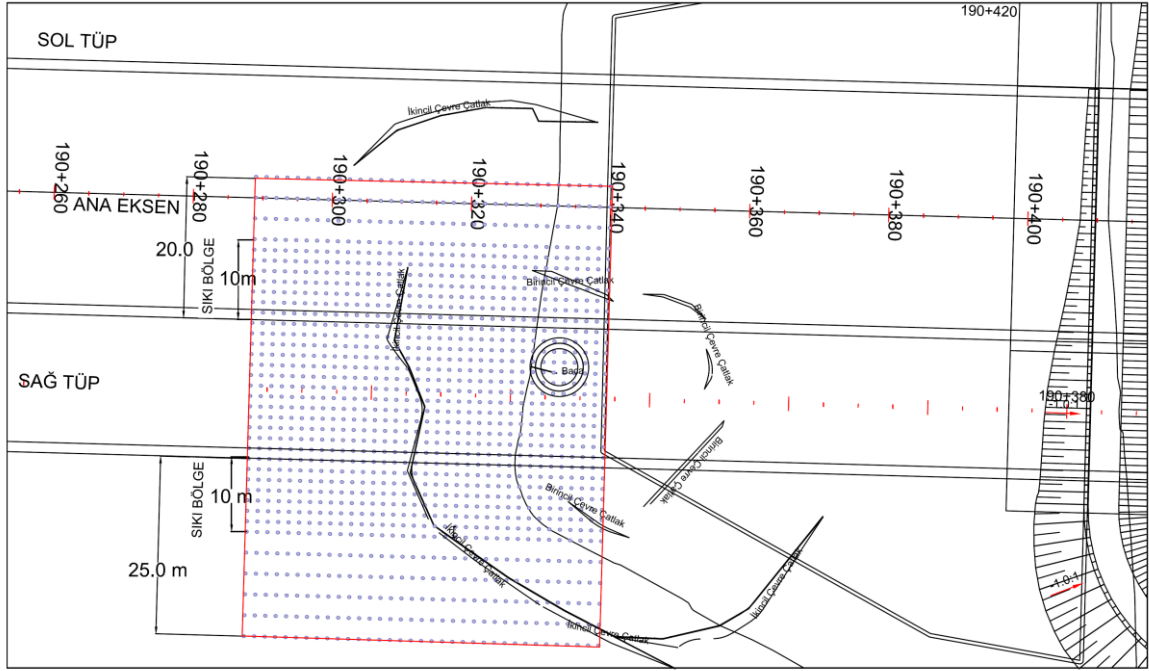


Şekil 6. GD tüpü çıkış kesimi derin kuyu pompajı uygulaması

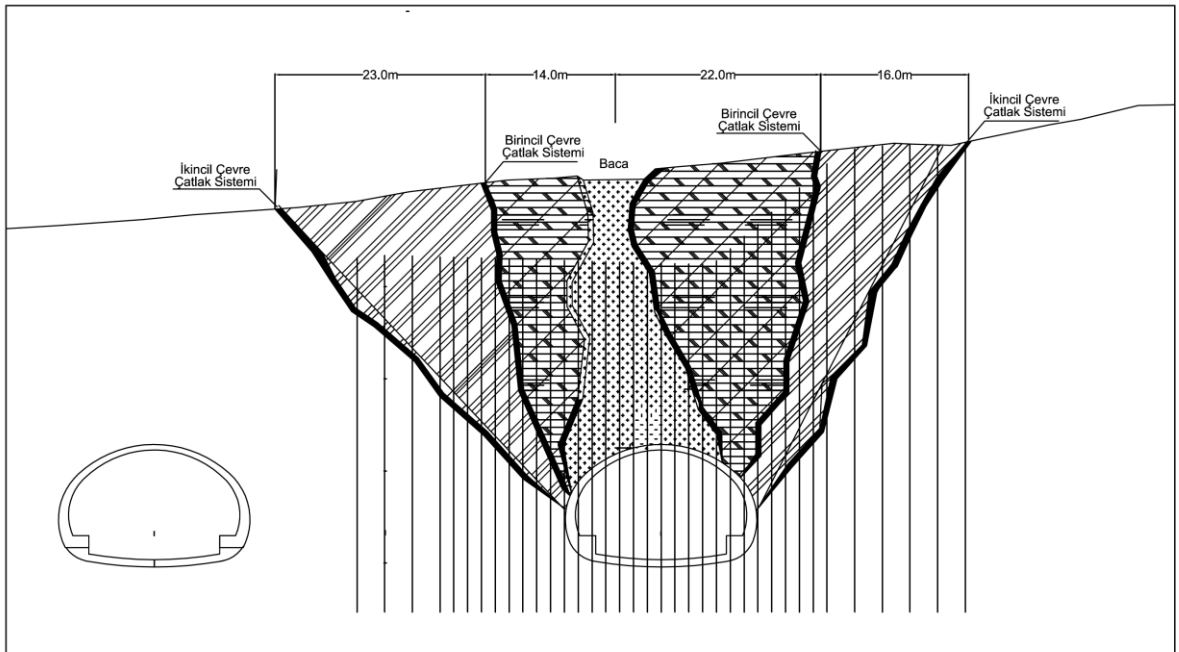
3.2. Tünel Üstü Enjeksiyonu

Araştırma sondajı verileri özellikle göçük bölgesinde hareketlerin mobilize olması sonucu mevcut birimlerin tamamıyla ayrıştığını ve dayanımlarının büyük bir bölümünü kaybederek artık dayanım özellikleri sergilemeye başladığını göstermiştir. Bu sebeple göçük bölgesi ve çevresinde örselenen kaya-zemin ortamının çimento enjeksiyonu ile güçlendirilerek katılaştırılması planlanmıştır. Özellikle tünel üst seviyelerinde yer alan aşırı

ayrışmış kilaşı birimi ile hareketlerin mobilize olduğu sağ ve sol cephelerin enjeksiyon ile iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Enjeksiyon işlemine öncelikle tünel üstünden yapılacak düşey delgilerle başlanması ve optimum enjeksiyon harcı su/çimento oranına yerinde yapılacak denemelerle karar verilmesi planlanmıştır. Enjeksiyon harcının tünel içinden kaçışını önlemek üzere tünel içinde Km:190+341 kesitinin duvar örülerek tam olarak kapatılması ve arkasının (pasa ile duvar arası) zayıf beton ile doldurularak bariyer oluşturulması öngörülmüştür. Tünel tavanında yapılan enjeksiyon işlemine ait plan Şekil 7’de, göçük mekanizmasını tarifleyen enjeksiyon uygulama kesiti Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 7. GD tüpü çıkış kesimi enjeksiyon uygulama planı



Şekil 8. GD tüpü çıkış kesimi göçük mekanizması ve enjeksiyon uygulaması kesiti

Tünel sağ tüp yerleşiminin yamaç tarafında 25 metre, komşu tüp tarafında ise 20 metre dışarı taşan alanda tünel taban kotunu 5 metre geçen düşey delgilerle 3.0mx3.0 m aralıkta birincil enjeksiyonlama işlemi tamamlanmıştır. Daha sonra birincil enjeksiyonun aralarında ikincil sıkılaştırma enjeksiyonu benzer şekilde uygulanmıştır. Enjeksiyon alım miktarları değerlendirilerek işlemin farklı bölgelerde devam ettirilmesine veya yeterliliğine karar verilmiştir. Enjeksiyona dair detaylar uygulama esnasında raporlandırılmış, uygulama boy, sıklık ve alırlara dair değerlendirmeler yapılmıştır. Benzer biçimde uygulama ertesi sahada belirlenen noktalarda karotlu sondajlar yapılmış, enjeksiyonun devamlılığı ve başarısı teyit edilmiş, numuneler üzerinde yapılan deneyler vasıtasıyla tasarımda öngörülen enjeksiyonla iyileştirilmiş zemin dayanım ve deformasyon parametrelerinin sağlandığı teyit edilmiştir. Enjeksiyon işleri Temel Sondaj ve Enjeksiyon Teknik Şartnamesi'ne (DSİ, 2016) uygun bir biçimde tamamlanmıştır.

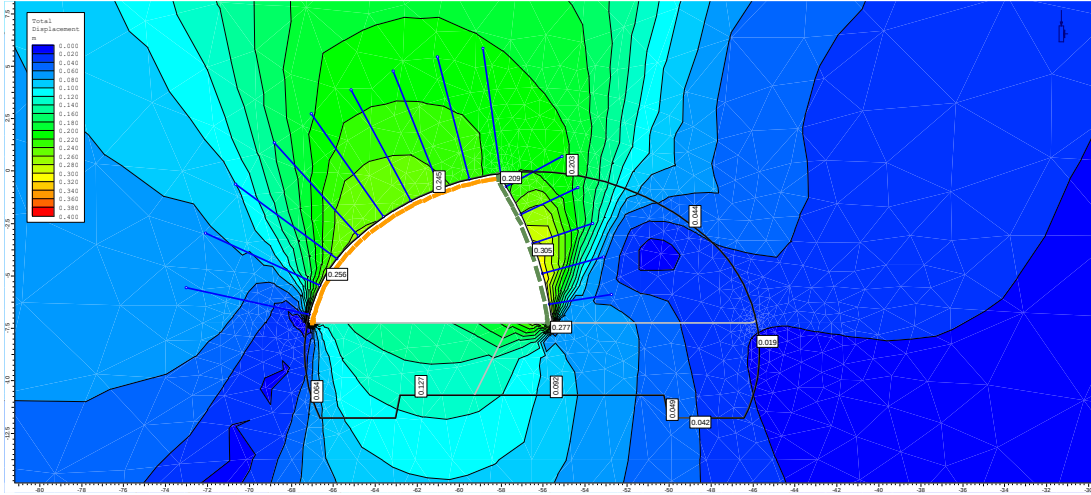
3.3. Destek Sistemleri

Göçük probleminin ana unsuru olan çok zayıf kaya koşullarının tünelin bu kesiminde kritiklik arz edeceği düşüncesinden hareketle drenaj ve enjeksiyon işlemlerinin yanı sıra özel kazı-destek sistemlerinin uygulanması gerektiği sonucuna varılmıştır. Sorunlu bölgede üst yarı sağ ve sol galeri birinci ve ikinci aşama kazıları tamamlanmış, ortalama 50cm mertebelerinde deplasmanlar raporlandırılmış ve devamında göçük oluşmuştur. Bu şekliyle öncelikli olarak tünel üstü enjeksiyonlamaları yapılarak göçüğün hem tavan hem de duvarlarını oluşturan birimlerin geomekanik özellikleri iyileştirilerek, kazı ve destek uygulamalarına uygun hale getirilmiştir. Daha sonra yedi aşamalı kazı ve destekleme uygulamasına geçilmiştir. 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.

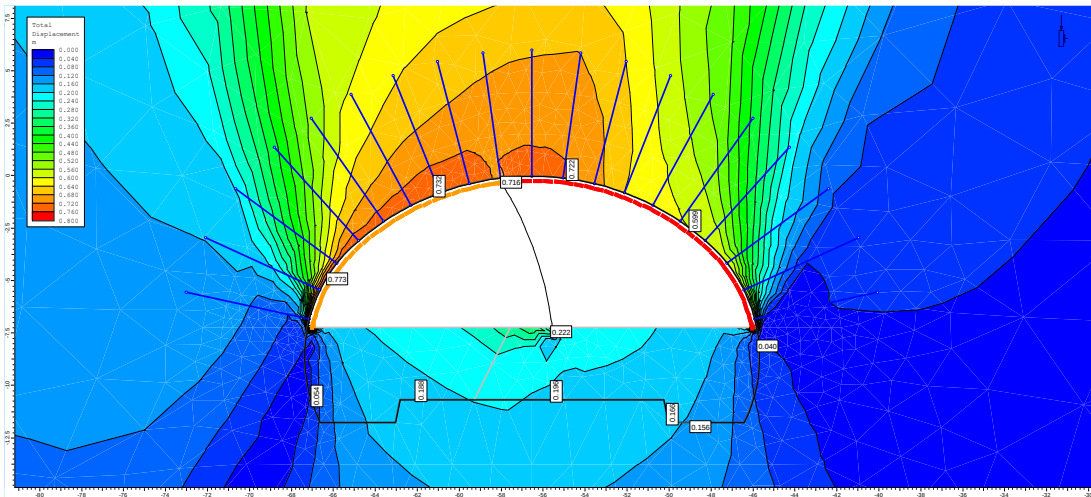
İmalatlar sırasında sahada tesis edilen inklinometre kuyuları vasıtasıyla ortamdaki yanal deplasmanların gelişimi izlenmiş, çatlaklar periyodik olarak takip edilmiştir. Çalışma alanı ve çevresinde tesis edilen sistematik röper noktaları yardımıyla vektörel hareketler periyodik olarak jeodezik yöntemlerle yeterli hassasiyette ölçülmüş, tünel içi rutin geoteknik ölçümler NATM ve gözlemsel yöntem prensipleri dahilinde günlük bazda sıklaştırılmıştır (Peck, 1969; Nicholson vd., 1999).

3.4. Destek Sistemi Tasarım Detayları

Enjeksiyon işlemi sonrası kazı ve destekleme aşamasında hedeflenen dayanım özelliklerinin belirlenmesi için öncelikli olarak pasa malzemesinin kalıntı dayanım ve deformasyon parametreleri tespit edilmiştir. 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 kıltaşı birimine ait bünye parametreleri geri analiz yöntemiyle tahmin edilmiştir. Birinci ve ikinci aşama kazı ve destek uygulamaları ertesi ölçülen deformasyon davranışına uygun oluşturulan sonlu eleman analiz sonuçları Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir.

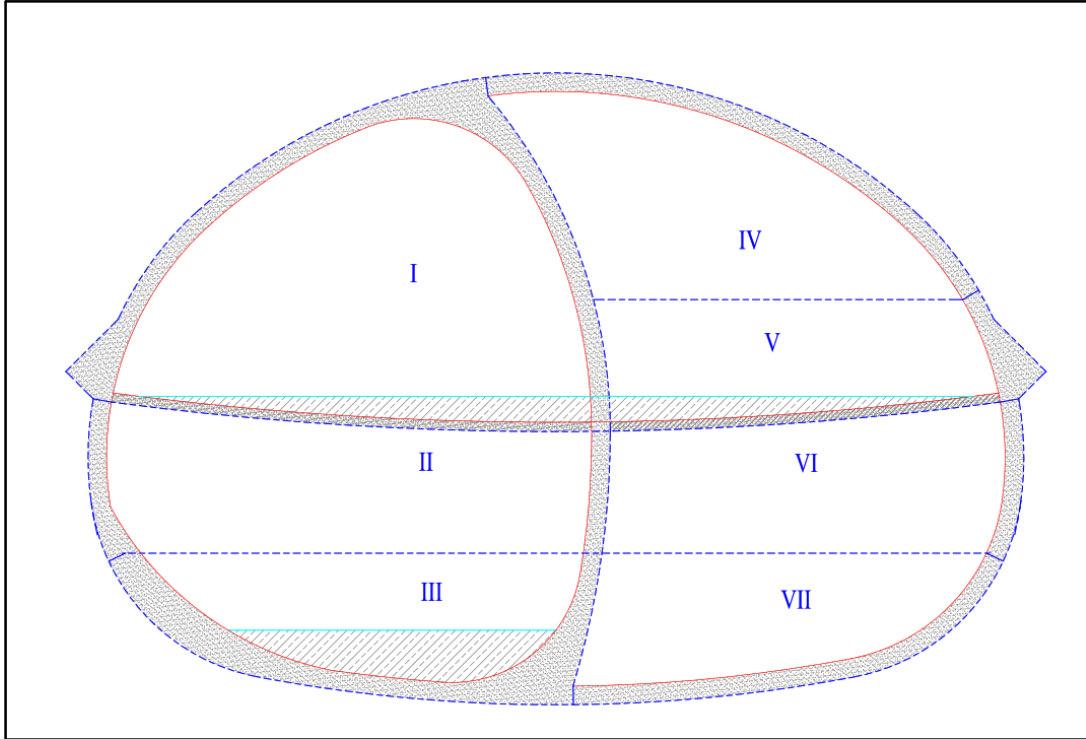


Şekil 9. GD tüpü çıkış kesimi birinci aşama kazısı sonrası deformasyonlar



Şekil 10. GD tüpü çıkış kesimi ikinci aşama kazısı sonrası deformasyonlar

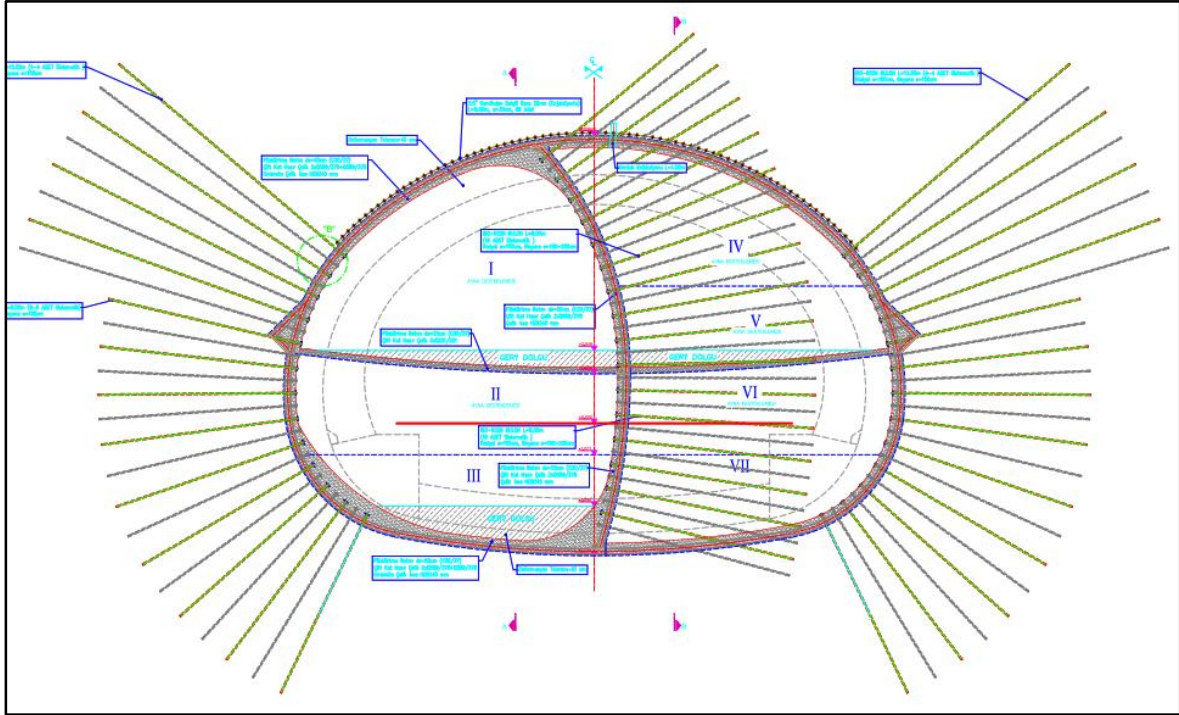
Kiltaş birimine ait dayanım ve deformasyon parametrelerinin geri analiz yöntemiyle belirlenmesini takiben enjeksiyon sonrası hedeflenen iyileştirilmiş malzeme dayanım ve deformasyon parametreleri öngörülmüş, iyileştirme işlemi sonrası yapılan kalite kontrol deneyleri vasıtasıyla yeterlilikleri teyit edilmiştir. Analizlerin devamında enjeksiyonla iyileştirilmiş malzeme parametreler kullanılarak kazı aşamasında uygulanacak destek unsurlarına ait malzeme ve kesit özellikleri ile kazı aşamaları belirlenmiştir. Duraylılığını tamamiyle yitirmiş pasa malzemesi içerisinde planlanan ortalama 350m² kesit alanına sahip tünel ilerleme kazılarının toplam yedi aşamada yapılması öngörülmüş (Şekil 11), destek unsurlarına ait detaylar Tablo 1’de ve Şekil 12’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 1’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 iç kaplama tarafından taşındığı kabulü yapılmış, iç kaplama betonarme hesapları AASHTO (2017), Bölüm 8 referans alınarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 11. GD tüpü çıkış kesimi kazı aşamaları

Tablo 1. Destek sistemi özet tablosu

NATM Sınıfı	C4 (Taban Kemerli)
Kaya Bulonu ($L \cdot a \cdot b$) (L =Bulon Boyu, a =Kesitte Aralık, b =İlerlemede Aralık)	IBO Bulon; Omuzlarda 12mx1.0mx1.0m Diğer kesimlerde 8mx1.0mx1.0m
Ayna Desteği	IBO Bulon 8mx1.0mx1.50m
Püskürtme Betonu (C30/37)	50cm
Hasır Çelik (2xQ589x378)	2sıra
Enjeksiyonlu Şemsiye Borusu	30cm arayla 3.5'' Kendinden delen enjeksiyonlu şemsiye borusu, $L=9m$
Çelik İksa	HEB240 0.50m arayla



Şekil 12. GD tüpü çıkış kesimi destek unsurları

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada Karayolları 1. Bölge Müdürlüğü sınırları içinde yer alan Kuzey Marmara Otoyolu Projesi Kurtköy-Akyazı Kesiminde T5 tüneli çıkış portalına yakın sağ tüpte oluşan duraylılık sorunları ve çözümleri değerlendirilmiştir. Bu amaçla araştırma sondajları ve inklinometrik ölçümler yapılmış, idealize jeolojik profil ve olası göçük mekanizması belirlenmiş, iyileştirme, drenaj ve destek unsurlarından oluşan bir proje geliştirilerek uygulanmıştır. Çalışmalar neticesinde aşağıda sıralanan bulgulara ve sonuçlara ulaşılmıştır:

Duraylılık sorununun sebeplerinin ve olası etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen araştırma sonuçlarına göre göçüğün, su gelirlerinin gözlemlendiği GD tüpünde çıkışa yakın 50m'lik sağ omuz kesiminde ortalama 20-25 derece eğimde yerleşik Kiltası-Silttaşı-Kumtaşı birimlerine ait aşırı ayrılmış ve bozuşmuş bir tabakanın varlığı sebebiyle olduğu sonucuna varılmıştır.

Problemin çözümüne yönelik drenaj, iyileştirme ve güçlendirilmiş özel tip tahkimattan oluşan aşamalı bir çözüm projesi geliştirilmiştir. Bu amaçla öncelikli olarak Kandıra Yolu tarafında, oluşan gerilme çatlaklarının gerisinde proje tünel taban kotlarının 5-10m altına inecek şekilde derin kuyu sondajları yapılmış, özellikle yağışlı sezon ertesi oluşan ve sağ omuzda ayrılmış kiltası zonundan gelen suların kurutulması hedeflenmiştir.

Göçük bölgesi ve çevresinde örselenen kaya-zemin ortamı çimento enjeksiyonu ile güçlendirilerek katılaştırılmıştır. Tünel üst seviyelerinde yer alan aşırı ayrılmış kiltası – silttaşı -kumtaşı birimi ile hareketlerin mobilize olduğu sağ ve sol cephelerin enjeksiyon ile iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Uygulamanın özel önem arz etmesi sebebiyle, imalat ve kalite kontrol koşullarına özen gösterilmiştir. Bu amaçla uygulama ertesi sahada

belirlenen noktalarda karotlu sondajlar yapılmış, enjeksiyonun devamlılığı ve başarısı teyit edilmiş, numuneler üzerinde yapılan deneyler vasıtasıyla öngörülen enjeksiyonla iyileştirilmiş zemin dayanım ve deformasyon parametrelerinin sağlandığı teyit edilmiştir.

Enjeksiyon işlerinin tamamlanmasını takiben tünel imalatlarına özel kazı-destek sistemleri ile devam edilmiştir. 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, iyileştirme 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 tünel hizmete açılmıştır.

KAYNAKLAR

- AASHTO (2017), LRFD Bridge Design Specifications, 8th Ed., September, 2017.
- Austrian Society for Geomechanics, (2010), "NATM, The Austrian practice of conventional tunneling", ISBN 978-3-200-01989-8
- DSİ (2016), "Temel Sondaj ve Enjeksiyon İşleri Teknik Şartnamesi", Ankara.
- Hergül. T. (2017), "Kuzey Marmara Otoyolu Projesi Kurtköy-Akyazı Kesimi Yolu T5 Tüneli Çıkış Kesimi İyileştirme Uygulama 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., Kuhnenn, 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.

