

İlksu Tünellerinin Jeoteknik Değerlendirmesi

Mustafa Kerem KOÇKAR*

Haluk AKGÜN**

ÖZ

Yapılan bu çalışma, kaya malzemelerinin ve kaya kütlelerinin mühendislik jeolojisi ve jeoteknik özelliklerinin incelenmesi ve Antalya-Alanya Yolu güzergahında öngörölmüş olan iki karayolu tünel projesi boyunca (İlksu 1 ve İlksu 2) uygun destek sistemleri ve duraylılık yöntemlerinin önerilmesinden oluşmaktadır. Tünellerin zeminleri Q, RMR ve NATM sistemlerine göre sınıflandırılmış, destek sistemleri ve duraylılık teknikleri belirlenmiştir. Tünel zeminlerinin deformasyon modülü ve kayma dayanımı parametreleri Jeolojik Dayanım İndeksi kullanarak elde edilmiştir. Tünel ağızları ile yamaç şevlerindeki süreksiz kaya zeminlerin şev duraylılık analizleri kinematik ve limit denge yöntemleri ile yapılmıştır. Gelişigüzel eklemlili, aşırı yapraklanmış ve kil gibi davranan bozunmuş litolojilerin statik duraylılık analizleri paket programlar ile analiz edilmiş ve gerekli destek sistemleri önerilmiştir. Kaya kütleleri ile örtüşen uygun destek sistemleri sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir.

ABSTRACT

Geotechnical Evaluation of the İlksu Tunnels

This study was performed to investigate the engineering geological and geotechnical characteristics of the rock material and rock mass, and to provide appropriate support recommendation and stabilization techniques along the two autoroad tunnel projects (İlksu 1 and İlksu 2) located along the Antalya-Alanya autoroad. The tunnel grounds were classified according to the Q-system, RMR and NATM, and support systems and stabilization techniques were determined. The deformation moduli and shear strength parameters were obtained by using the Geological Strength Index. In order to determine the stability of the portal and cut slope sections, kinematic and limit equilibrium analyses were performed for the discontinuous rock slopes. Static stability analyses of irregularly jointed, highly foliated and deformable soil-like lithologies were analyzed by slope stability softwares, and recommendations were made regarding the required support systems. The interactions of the support systems with the rock mass were analyzed through finite element analysis.

Not: Bu yazı

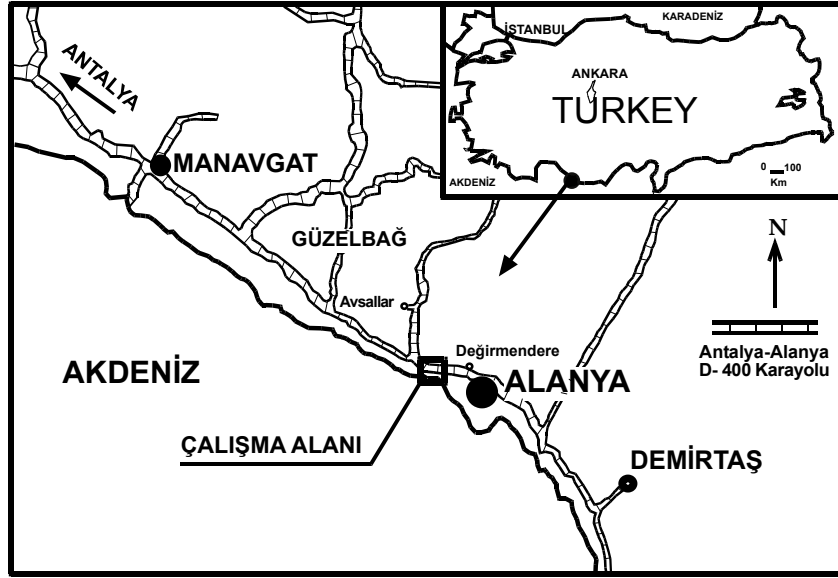
- Yayın Kurulu'na 18.07.2002 günü ulaşmıştır.
- 30 Haziran 2004 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Jeoloji Müh. Böl., Ankara – mkoçkar@metu.edu.tr

** Orta Doğu Teknik Üniversitesi Jeoloji Müh. Böl., Ankara – hakgun@metu.edu.tr

1. GİRİŞ

Çalışma alanı, Alanya'nın yaklaşık 7 km batısında ve Akdeniz sahil şeridi boyunca, Antalya-Alanya Devlet Yolu 4. Kısım güzergahı üzerinde olup (Şekil 1), 1/ 25000 ölçekli Karayolları Genel Müdürlüğü Topoğrafik Haritasının Alanya Paftası içerisinde yer almaktadır.



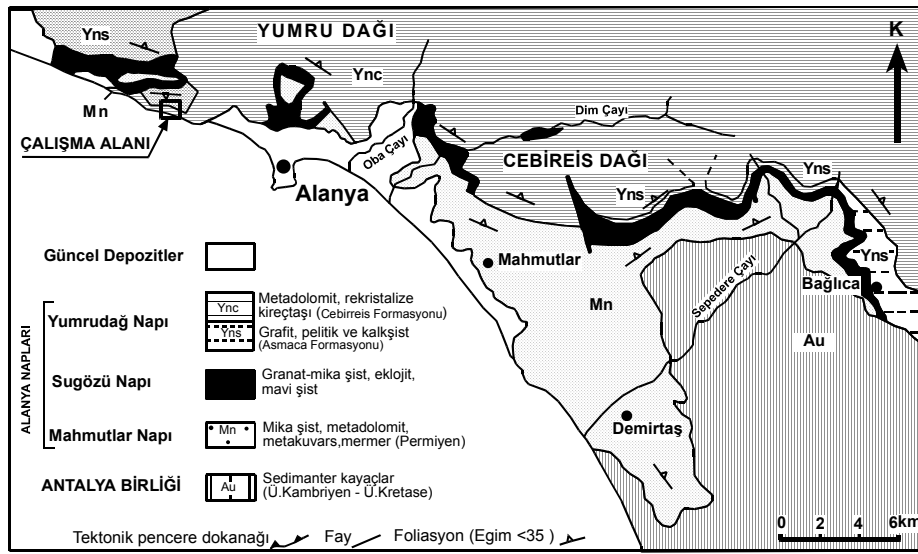
Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası

Bu çalışma, kaya malzemelerinin ve kaya kütlelerinin mühendislik jeolojisi ve jeoteknik özelliklerinin incelenmesi ve yapımı planlanan iki karayolu tünel projesi boyunca uygun destek sistemleri ve duraylılık tekniklerinin önerilmesinden oluşmaktadır. Bu tüneller sırasıyla Ilıksu 1 (Km: 127+545-128+074) ve Ilıksu 2 (Km: 128+155-128+317) olarak adlandırılmıştır. Bu tünelleri tasarlamak için jeolojik haritalama ve temel sondaj çalışmaları ile birlikte yerinde ve laboratuvar deneyleri yapılmış, jeoteknik ve jeolojik parametreler hesaplanmış ve jeoteknik yorumlamalar yapılmıştır.

Antalya-Alanya Devlet Yolu 4. Kısım Karayolu inşaat çalışmaları, sözü edilen bu karayolunun geliştirilmesi ve genişletilmesi kapsamında karayolu inşaatı, viyadük ve tünel çalışmalarını içine alır. Genel olarak proje alanındaki çalışmalar sonucunda, Çandırtepe, Ulaş, Devren ve Ilıksu 1 ve 2 tünelleri, D-400 Karayolunun 2x2 şeritli hale dönüştürülmesi kapsamında, Alanya yaklaımında sol yol geçişini sağlamak üzere tek tüp olarak projelendirilmiştir. Bu tünellerden, Çandırtepe, Ulaş ve Devren tünellerinin yapım çalışmaları bitmek üzeredir. Ilıksu 1 ve 2 tünelleri ile ilgili kapsamlı jeoteknik çalışmalar Yüksel Proje Uluslararası A.Ş. tarafından 2000 yılında tamamlanmış ve sözü edilen tünellerin bitirilme aşamasına gelinmiştir [1].

2. JEOLJİ

Bölgesel jeolojik çalışmalara göre inceleme alanındaki litolojik birimler Alanya Birliğinin üyeleridir. Alanya Birliği, ilçe merkezinin 20 km doğusundan başlayarak batıya doğru uzanan kesimde üst üste duran üç metamorfik naptan oluşur [2]. Farklı istiflenme ve metamorfizma gösteren bu naplar, yapısal konumlarına göre, alttan üste doğru Mahmutlar Formasyonu (alt nap), Sugözü Formasyonu (orta nap) ve Yumru Dağı Grubu (üst nap) olarak adlandırılmışlardır. Proje alanında, sadece Alanya Masifinin en üst seviyesi olan Yumru Dağı Napına ait birimler gözlemlenmektedir (Şekil 2).

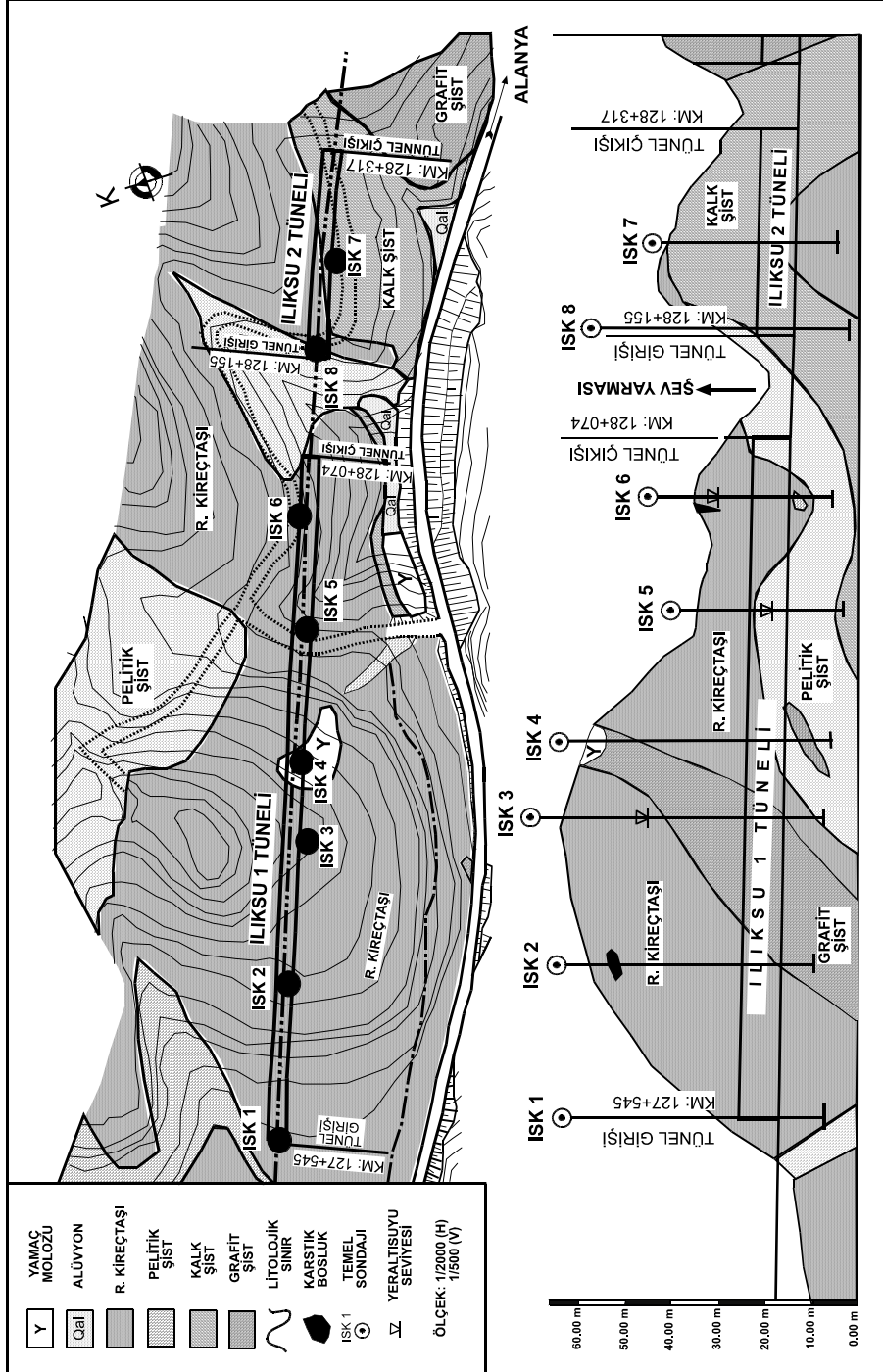


Şekil 2. Basitleştirilmiş Alanya Naplarını gösterir bölgesel Alanya tektonik haritası [3]

Proje alanındaki Alanya Birliğinin en üst napını oluşturan Yumru Dağı Grubunda iki birim ayrılmıştır. Bunlardan biri, Cebireis Formasyonunun üst seviyeleridir. Bu seviyeler rekristalize kireçtaşının üzerlediği pelitik şist, kalk şist ve meta-dolomitlerden oluşur. Diğeri ise, bütün seviyeleri ile yüzeylenen Asmaca Formasyonudur. Bu birim yer yer arakatlı olarak pelitik şist, kalk şist ve grafit şistlerden oluşmaktadır.

3. ÇALIŞMA ALANINDAKİ KAYA BİRİMLERİNİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

Çalışma alanında ayrıntılı jeolojik ve jeoteknik çalışmalar sonucunda 1/2000 ölçekli jeolojik harita (sondaj lokasyonları ile birlikte) ve 1/500 ölçekli profil kesiti hazırlanmıştır (Şekil 3). Ayrıca, proje alanında kinematik analizlerde kullanılmak üzere, her litolojik birimde ve tünellerin giriş ve çıkış ağzlarında süreksizlik ölçümleri yapılmış ve 598 süreksizlik ölçümü (tabaka düzlemi ve eklem) alınmıştır.



Şekil 3. İlksu tünelleri jeolojik haritası ve kesiti

Tünel zeminini oluşturan başlıca kayaçlar rekristalize kireçtaşı, kalk şist, pelitik şist, grafit şist ve bu birimlerin ardalanmaları ile temsil edilir. Proje alanındaki Iıksu 1 ve Iıksu 2 Tünelleri sırasıyla 529 m ve 165 m uzunlukta dırlar; bu tüneller arasında kalan ve yamaç şevleri olarak geçilecek kısım ise 81 m uzunluğundadır.

Pelitik şistler tünel kazısı boyunca Iıksu 1 tünelinin çıkışında, Iıksu 2 tüneli girişinde ve bu iki tünel arasında kalan, yamaç şevleri olarak geçilecek kısımlarda belirlenmiştir. Bu birim yeşil-yeşilimsi gri renkli, orta-çok ayrışmış, zayıf-orta zayıf dayanımlıdır (Şekil 4). Şistosite düzlemleri boyunca çok kolay ayrılan bu birimde, sürekli olan yapraklanma düzlemleri kaygan-parlak ve ondülelidir [4]. Eklemlı çatlakların ortalama süreksizlik aralığı 10-60 mm arasında değişir. Tek eksenli basma dayanımı çok düşük (3-29 MPa) ve sondaj verilerine göre pelitik şistlere ait RQD değeri “sıfır” ile % 81 arasında değişir.



Şekil 4. Proje alanındaki pelitik şist ve kalk şist ardalanması

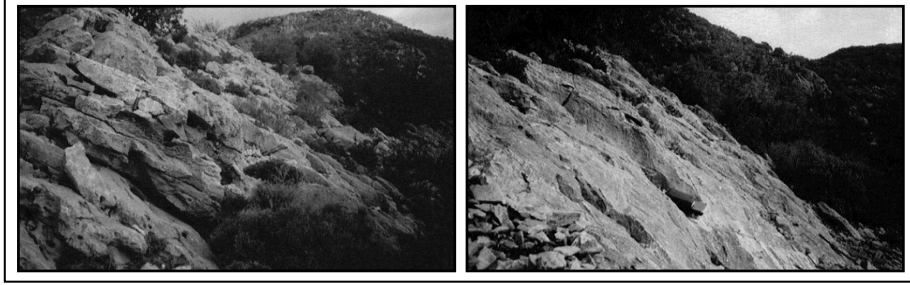
Grafit şistler tünel kazısı boyunca Iıksu 1 tünelinin orta kısımlarında ve Iıksu 2 tünelinin büyük bir kısmında belirlenmiştir. Şistosite düzlemleri boyunca kolayca ayrılan bu birim yer yer kireçtaşı ve kalk şist ara düzeyleri içerir. Tünel zemininin en sorunlu birimi olan grafit şistler siyahımsı koyu gri-siyah, dağılgan, zayıf-orta zayıf dayanımlı, orta-çok ayrışmış ve parçalıdır (Şekil 5). Yapraklanma düzlemleri genelde açık, kaygan, kalsit ve kil dolguludur ve orta derecede süreklidir [4]. Aşırı yapraklanma ve mineralojik bileşimi nedeniyle grafit şist, dış etkenlere, özellikle suya karşı çok duyarlı, yüzeye yakın kesimlerde çok ayrışmalı ve zayıf kaya niteliğindedir. Tek eksenli basma dayanımı düşük (16-50 MPa) olup RQD değeri “sıfır” ile % 62 arasında değişir.



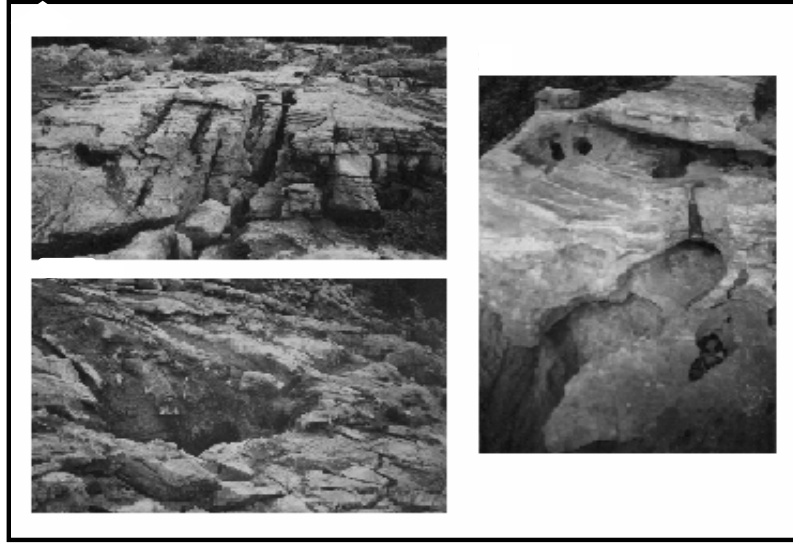
Şekil 5. Grafit şist (not: kaya kütlesi düzensiz ve gelişigüzel eklemlı, aşırı yapraklanmış ve ayrışmış olup, kil gibi davranım göstermektedir)

Kalk şistler tünel kazısı boyunca Ilıksu 2 tünelinin büyük bir kısmında belirlenmiştir. Bu birim yer yer kireçtaşı bandlı ve grafit ve pelitik şist arakatlıdır (Şekil 4). Açık ve koyu gri, seyrekçe boz renklidir ve hemen hemen tüm düzeylerinde kalsit damarları içerir. Bu birim az-orta derecede ayrışmış, dayanımlı ve orta dayanımlıdır. Eklemler, açık, pürüzlü ve ondüleli ve aynı zamanda grafit dolguludur. Tek eksenli basma dayanımı 16-50 MPa aralığındadır. Ağırlıklı olarak orta (20-60 cm) süreksizlik aralıklarından oluşan bu birimde foliasyon düzlemleri süreklidir [4]. Kalk şistlerde belirlenen RQD değerlerinin genelde yüksek olmalarına karşın pelitik ve grafit şistlerle ardalanmalı yapıları nedeniyle sondaj verilerine göre ortalama olarak “sıfır” ile % 20 arasında değişir.

Rekristalize kireçtaşı tünel kazısı boyunca Ilıksu 1 tünelinin büyük bir kısmında ve yer yer Ilıksu 2 tünelinin orta bölümlerinde belirlenmiştir (Şekil 6). Gri-açık gri, dayanımlı ve az ayrışmıştır. Bu birimde karstlaşma yaygındır ve karstik boşluklar cm boyutundan birkaç metreye kadar değişir (Şekil 7). Öte yandan, kireçtaşı biriminde yer yer şist bandları ve formasyon içi çakıltaşı düzeyleri gözlenir. Kalın katmanlı kireçtaşlarında süreksizlik aralığı 60-200 cm arasında değişir [4]. Tek eksenli basma dayanımı yüksek (30-117 MPa) olup RQD değeri % 61 ile % 73 arasında değişir.



Şekil 6. Proje alanındaki bloklı kaya kütleli yapısındaki rekristalize kireçtaşı



Şekil 7. Çalışma alanındaki bloklı/bozunmuş-orta ve dağılmış-zayıf kaya kütleli aralığındaki karstik kireçtaşı

Tünel tasarımı için gerekli olan jeomekanik parametreleri elde edebilmek için 8 ayrı sondaj lokasyonundan karot numuneleri alınmıştır. Bunun sonucunda, kireçtaşlarından (karstik, formasyon içi, vs.) yaklaşık 37-38 adet iyi kalitede karotlu numune elde edilmiştir. Ancak grafit şist, pelitik şist ve kalk şistlerden elde edilen numunelerin çoğu iyi kalitedeki karot numunelerini temsil edecek düzeyde değildir. Zeminin jeomekanik özelliklerini laboratuvarında saptamak için yapılan kaya mekaniği deneylerinde kullanılacak olan numuneler iyi kalite karot numunesi standardında olmalıdır (karot numunesinin uzunluğu > 100 mm). Ancak çalışma alanındaki grafit şist, pelitik şist ve kalk şistler gibi düzensiz ve gelişigüzel eklemlili, aşırı yapraklanmış ve ayrışmış litolojilerde, iyi kalitede özellikler gösteren standart karot numuneleri elde etmek her zaman mümkün değildir. Bu nedenlerle, kaya mekaniği laboratuvar deneylerindeki zorlukları aşmak ve tünel tasarımı için gerekli olan jeomekanik parametreleri elde etmek için Kaya Kütleli Sınıflama Sistemleri ve Jeolojik Dayanım İndeksi gibi birtakım basitleştirilmiş yöntemler kullanılmıştır. Tünel

İlksu Tünellerinin Jeoteknik Değerlendirmesi

zeminleri için her sondajdan elde edilen ve bu sondajlardaki litolojileri temsil eden karot numuneleri için yapılan laboratuvar jeomekanik deneyleri, Türkiye Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Zemin Mekaniği ve Tüneller Şubesi Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilmiş olup, sonuçlar Çizelge 1’de verilmektedir.

Çizelge 1. Tünel zeminleri için sondajlardan elde edilen ve bu sondajlardaki litolojileri temsil eden karot numuneleri için yapılan laboratuvar deney sonuçları

Sondaj No.*	Numune Derinliği (m)	Tek Eksenli Basma Dayanımı (Örselenmemiş) (MPa)	Elastik Modül, E (GPa)	Poisson Oranı, ν	Doğal Birim Hacim Ağırlık γ_t (kN/m ³)	Numunenin Tanımı
ISK 1	4.60 - 4.75	116	-	-	26.38	Kireçtaşı
ISK 2	15.80 - 16.10	68	-	-	26.48	Kireçtaşı
ISK 2	23.35 - 23.50	30	23	-	26.58	Kireçtaşı
ISK 2	43.40 - 43.63	87	-	-		Grafit şist
ISK 2	44.45 - 44.70	65	-	-	26.58	Grafit şist
ISK 3	16.00 - 16.20	117	-	-		Kireçtaşı
ISK 3	24.45 - 24.60	104	40	0.42	26.77	Grafit şist
ISK 3	33.35 - 33.50	41	-	-		Grafit şist
ISK 3	33.85 - 34.00	84	-	-		Grafit şist
ISK 3	35.90 - 36.10	72	-	-	26.18	Grafit şist
ISK 3	36.40 - 36.50	49	37	0.07		Grafit şist
ISK 4	20.05 - 20.25	28	-	-		Kireçtaşı
ISK 4	23.75 - 23.90	42	-	-		Kireçtaşı
ISK 4	28.95 - 29.20	62	30	0.07		Kireçtaşı
ISK 4	32.75 - 33.00	64	32	0.22		Kireçtaşı
ISK 4	33.75 - 34.00	112	-	-	25.79	Kireçtaşı
ISK 4	40.00 - 40.15	29	-	-		Pelitik şist
ISK 4	41.50 - 41.65	6	-	-		Pelitik şist
ISK 4	43.50 - 43.85	3	-	-		Pelitik şist
ISK 5	8.75 - 9.00	90	61	0.43	26.28	Kireçtaşı
ISK 5	28.30 - 28.45	3.5	1.0	-		Pelitik şist
ISK 7	16.70 - 16.90	92	88	0.40	26.18	Kalk şist
ISK 7	18.80 - 19.05	62	-	-		Kalk şist
ISK 7	24.00 - 24.20	65	-	-		Kireçtaşı
ISK 7	27.20 - 27.45	85	-	-	26.28	Kireçtaşı
ISK 8	15.25 - 15.50	16	-	-		Grafit şist
ISK 8	17.00 - 17.25	50	26.6	0.05	27.07	Grafit şist

* Sondaj lokasyonları Şekil 3’te belirtilmiştir.

4. İLKSU TÜNELLERİNDEKİ KAYA KÜTLELERİNİN MÜHENDİSLİK SINIFLAMASI VE TÜNEL DESTEK SİSTEMİ TASARIMI

Proje alanındaki kaya kütlelerinin mühendislik sınıflamaları, tüneller boyunca yapılan mühendislik jeolojisi çalışmalarına, ve tünel zeminini oluşturan birimlerin jeoteknik özelliklerine göre yapılmıştır. Tünellerin zeminleri Q-Sistem ve RMR yöntemlerine göre sınıflandırılmıştır. Tünel zemini RMR ve Q-Sistem korelasyonu ile elde edilen ve bu sınıflandırmalarla bütünsellik gösteren Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemine (NATM)

göre de sınıflandırılmıştır. Tünellerin gerek projelendirilmelerinde, gerekse de yapımlarında bu üç sınıflandırma sisteminin ilkeleri esas alınmıştır. Bu üç sınıflandırma sistemi her bir sondaj için ayrı ayrı uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır (Çizelge 2).

Çizelge 2. Çalışma alanındaki kaya kütlelerinin mühendislik sınıflamaları

Tünel	Km	Litoloji	Sondaj No.	Kesit Uzunluğu (m)	Q	RMR	NATM
ILIKSU -1	127+ 545 - 127+ 585	R. Kireçtaşı	ISK- 1 (Portal)	40	2.11	53	B2
	127+ 585 - 127+ 675	R. Kireçtaşı	ISK- 2	90	7.31	59	B1
	127+ 675 - 127+ 685	R. Kçt. / Grafit Şist	Geçiş zonu	10	7.31	59	B2
	127+ 685 - 127+ 790	Grafit Şist	ISK- 3	105	0.23	31	B3
	127+ 790 - 127+ 800	Grafit Şist / R. Kçt.	Geçiş zonu	10	0.23	31	B2
	127+ 800 - 127+ 860	R. Kçt. / Pelitik Şist	ISK - 4	60	5.69	58	B1
	127+ 860 - 127+ 870	Pelitik Şist / R. Kçt.	Geçiş zonu	10	5.69	58	B2
	127+ 870 - 127 + 990	R. Kçt./ Pelitik Şist	ISK - 5	120	0.97	31	B3
127+ 990 - 128+ 074	R. Kçt./ Pelitik Şist	ISK - 6 (Portal)	84	0.57	46	B3	
Şev Yarması	128 + 074 - 128 + 155	Pelitik Şist	ISK - 6	81	0.57	46	B3
ILIKSU -2	128+ 155 -128 + 195	Kalk / Grafit / Pelitik Şist	ISK - 8 (Portal)	40	0.9	31	B3
	128 + 195 -128 + 275	Kalk / Grafit / Pelitik Şist /R. Kçt	ISK - 7	80	0.13	31	B3
	128 + 275 -128 + 317	Kalk / Grafit Şist	ÇIKIŞ (Portal)	42	0.80	31	B3

Q- Sistem [5], RMR [6] ve NATM [7] sistemlerine göre saptanan kalıcı tünel destekleme sistemleri (püskürtme beton, çelik hasır, çelik iksa, bulonlama ve enjeksiyon tipleri, vs.) ve duraylılık teknikleri Çizelge 3'te özetlenmiştir. Bu çizelgede, destekleme sistemleri ile yapılan karşılaştırmalar ve sınıflandırma sistemleri ile yapılan değerlendirmeler sonucunda Orta Kaya /B1 (Q aralığı 10-4), Orta Kaya /B2 (Q aralığı 4-1) ve Zayıf Kaya /B3 (Q aralığı 1-0.1) olarak 3 ana kaya kütleleri belirlenmiştir.

5. PROJE ALANINDAKİ KAYA KÜTLELERİNİN DAYANIMLARININ BELİRLENMESİ

Hoek-Brown yenilme ölçütü ilk olarak sıkı kenetlenmiş köşeli kaya parçalarından oluşan iyi ve orta kaliteli kaya kütlelerinin dayanımlarını elde etmek amacıyla kullanılmaya başlamıştır [8]. Yeteri kadar uygun ve kullanılabilir alternatif olmamasından ötürü çok geniş bir spektrumda, çok zayıf nitelikteki kaya kütleleri de dahil olmak üzere pek çok kaya kütlelerinin dayanımının bulunmasında da kullanılmıştır [9]. Fakat zayıf ve çok zayıf kaya kütlelerinde bu ölçütü tatmin edici sonuçlar vermemektedir. Bütün bu saydığımız uygulamalar, Hoek-Brown yenilme ölçütünün ilk biçiminin değişmesi gerekliliğini doğurmuş, zaman içerisinde geliştirilmiş ve birçok pratik uygulamaları kapsayacak biçimde güncelleştirilmiştir [10]. Bu ölçüt günümüzde basit olarak 3 ana ilkeye dayanmaktadır. Bunlar örselenmemiş kaya kütleleri için tek eksenli basma dayanımı (σ_{ci}), Hoek-Brown kaya sabiti değeri (m_i) ve Jeolojik Dayanım İndeksidir (GSI).

Çizelge 3. Ilıksu tünel projesi için önerilen destek türleri

Destek Çeşidi	B1 / $4 < Q < 10$ / Orta Kaya	B2 / $1 < Q < 4$ / Orta Kaya	B3 / $0.1 < Q < 1$ / Zayıf Kaya
İncelenen Bölüm	ILIKSU-1 (31%)	ILIKSU-1 (13%)	ILIKSU-1 (56%), ILIKSU-2 (100%)
Yapım Aşaması	Üst yarı ve alt yarı şeklinde	Üst yarı ve alt yarı şeklinde	Üst yarı ve alt yarı şeklinde
Kazı Açıklığı	Üst yarı (2.0-3.0 m) ve alt yarı (4.0 m)	Üst yarı (1.5-2.5 m) ve alt yarı (3.5 m)	Üst yarı (1.5-2.0 m) ve alt yarı (2.5 m)
Desteksiz Durma Süresi	2 - 4 gün	5 -10 saat	2 saat
NATM, Q- System ve RMR Destek Türü	Püskürtme beton (100 mm) + Çelik hasır (1 kat) + Sistematik bulon SN -bulonu ($\Phi = 26$ mm, L = 4 m, 2.0 x 2.5 m aralıklı). + nokta SN -bulon (gerektiğinde alt yarıda)	Püskürtme beton (150 mm) + Çelik hasır (1 kat) + Sistematik bulon SN -bulonu ($\Phi = 26$ mm, L = 4 m, 2.0 x 2.0 m aralıklı).	Püskürtme beton (250 mm) + Çelik hasır (2 kat) + Çelik iksa (1.0 x 1.0 m aralıklı) + Sistematik bulon SN -bulonu ($\Phi = 26$ mm, L = 4 m, 1.0 x 2.0 m aralıklı). + Enjeksiyonlu süren (L = 4m, 0.5 x 0.5 m aralıklı, her iki iksada bir).

Jeolojik Dayanım İndeksi, arazi gözlemlerinden yararlanarak farklı jeolojik ve jeoteknik koşullara bağlı olarak kaya kütlesi dayanımının hesaplanması esasına dayanır. Kaya kütlesi karakterizasyonu, kaya yapısı, yani blokluluğu veya süreksizliklerin yüzey koşulları (pürüzlülük, ayrışma, dolgu ve alterasyon, vb.) gibi görsel izlenimlere bağlıdır. Fakat bazı kaya kütlesi çeşitleri, özellikle zayıf kalitedeki kaya kütleleri (laminasyonlu ve foliasyonlu düzlemleri içeren makaslanmış zayıf kaya kütleleri), Jeolojik Dayanım İndeksi ile tam anlamıyla tanımlanamamakta ve belirli bir kategoriye konulamamakta idi. Çok düşük aralıklardaki bu foliasyonlu ve laminasyonlu zayıf kaya dayanımları da bu indekse dahil edilerek bu sıkıntı ortadan kaldırıldı [9]. Bu sistemin düzenlenmesiyle yapılan yüzey ve yeraltı kazısı uygulamalarında, özellikle gelişigüzel, aşırı çatlaklı ve yapraklanmalı kaya kütlelerinde Jeolojik Dayanım İndeksi ile tatmin edici sonuçlar elde edilmektedir.

Bu çalışmada Hoek-Brown yenilme ölçütü, kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon özelliklerinin güvenilir olarak belirlenmesinde ve kayma dayanımı parametrelerinin (içsel sürtünme açısı ϕ' ve kohezyon c') hesaplanmasında kullanılmıştır [10-12]. Proje alanındaki her sondaj için kaya kütlesi kalitesine göre jeolojik dayanım değer aralığı ve deformasyon modülü [13] belirlenmiştir. Bunlar Çizelge 4'te ayrıntılı olarak verilmiştir. Son olarak da çalışma alanındaki her sondaj için kaya kütlesi kalitesine bağlı olarak Jeolojik Dayanım İndeksi değer aralıkları belirlenmiş ve bunlar Çizelge 5'te verilmiştir.






Çizelge 4. Proje alanındaki her sondaj lokasyonundaki kaya kütlelerinin jeomekanik özellikleri

Jeomekanik Özellikler	ISK-1	ISK-2	ISK- 3	ISK-4	ISK- 5	ISK-6	ISK- 7	ISK- 8	ÇIKIŞ
Örselenmemiş kaya için tek eksenli basma dayanımı (σ_{ci} ; MPa)	116	87	4	84	5	112	5	3	5
Hoek-Brown kaya sabiti (m_i)	10	10	6	9	8	8	7	6	7
Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)	50±5	55±5	21±2	52±5	22±5	30±5	22±5	18±2	21±5
Hoek-Brown kaya kütleli sabiti (m_b)	16.77	2.00	0.36	16.21	0.49	0.657	0.43	0.32	0.42
Hoek-Brown kaya kütleli sabiti (s)	0.0039	0.0067	0	0.0048	0	0.0004	0	0	0
Kaya kütleli sabiti (a)	0.50	0.50	0.55	0.50	0.54	0.50	0.54	0.56	0.55
İçsel sürtünme açısı (ϕ')	31°	33°	20°	32°	23°	25°	22.5°	18°	22°
Kohezyon (c' ; MPa)	3.25	2.61	0.06	2.58	0.08	2.10	0.08	0.04	0.07
Kaya kütleli basma dayanımı (σ_{cm} ; MPa)	11.7	9.61	0.17	9.32	0.20	6.59	0.23	0.12	0.19
Kaya kütleli çekme dayanımı (σ_{tm} ; MPa)	0.27	0.29	0	0.24	0	0.074	0	0	0
Deformasyon modülü (E_m ; MPa)	10593	12438	353	10283	446	3162	446	274	446
Poisson Oranı (ν)	0.25	0.25	0.30	0.25	0.30	0.25-0.30	0.30	0.30	0.30
Kaya kütlelerinin yenilme sonrası davranışı	Ortalama	Ortalama	Çok Zayıf	Ortalama	Çok Zayıf	Zayıf	Çok Zayıf	Çok Zayıf	Çok Zayıf

6. ILIKSU TÜNEL AĞIZLARI VE ŞEV YARMALARI DURAYLILIK ANALİZLERİ VE JEOTEKNİK DEĞERLENDİRMELER

Proje alanındaki tünel ağızları ve yaklaşım bölümlerinde en uygun geometriye karar verebilmek ve tünel ağızı duraylılığını belirlemek üzere şev duraylılık analizleri yapılmıştır. Bu analizler, giriş ve çıkış ağızları ve yaklaşım bölümleri (Ilıksu 1 ve 2) ile iki tünel arasında kalan şev yarmalarının ayrıntılı jeoteknik değerlendirmelerini ve bu kesimler için gerekli destek sistemlerinin belirlenmesini içerir. Tünel tasarımı için zemin, topoğrafik koşullar ve kamulaştırma sınırı dikkate alınarak tünel ağız şevleri 1/5 (yatay (Y):düşey (D)) ve yamaç şevleri 1/3 (Y:D) olarak belirlenmiştir. Proje alanında öncelikle kinematik analizler ve iyileştirme ölçümleri, kinematik yenilme modlarının oluşum olasılıklarını ve türlerini belirlemek üzere düzenli tabakalı kaya şevler için yapılmıştır [14, 15]. Daha sonra, yeraltı seviyesi ve hidrostatik basınç koşulları da dikkate alınarak kaya şevlerinde limit denge analizleri yapılmıştır. Bu analizleri gerçekleştirmek için kullanılan kayma dayanımı parametreleri (içsel sürtünme açısı, ϕ' ve kohezyon, c') Çizelge 4'ten, kaya kütleli için birim hacim ağırlık değerleri Çizelge 1'den alınmıştır.

Çizelge 5. Çalışma alanındaki her sondaj yeri için tahmin edilen Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) değer aralıkları (Hoek ve diğerleri, 1998'den Türkçeleştirilmiştir)

YAPI	SÜREKSİZLİK YÜZEY KOŞULU	Yüze Kalitesi Azalır →				
		80	70	60	50	40
 BLOKLU- Üç adet kesişen ortogonal süreksizlik setinin oluşturduğu kübik bloklu, birbirleriyle çok iyi bağlanmış, örselememiş kaya kütlesi	SÜREKSİZLİK YÜZEY KOŞULU COK İYİ Çok pürüzlü ve ayrılmamış taze yüzeyler İYİ Pürüzlü, çok az ayrılmış, demir oksit ile sıvanmış yüzeyler ORTA Düz, orta derecede ayrılmış, bozunmuş yüzeyler ZAYIF Kayganlaşmış, yoğun katmanlar ve dolgunlar içeren, köşeli parçalı, aşırı derecede ayrılmış yüzeyler COK ZAYIF Kayganlaşmış, yumuşak kil katmanları ve dolgunları içeren, aşırı derecede ayrılmış yüzeyler					
 COK BLOKLU- Dört veya daha fazla süreksizlik setinin kesişmesinden oluşan köşeli bloklar içeren, kısmen örselemiş kaya kütlesi				50 ISK- 1, 2, 4		
 BLOKLU/ÖRSELENMİŞ- Birbirini kesen çok sayıda süreksizlik setinin oluşturduğu köşeli bloklar içeren, kıvrımlanmış ve/veya faylanmış kaya kütlesi					30 ISK- 6	
 PARÇALANMIŞ- Köşeli ve yuvarlak kaya parçalarının bir araya gelmesinden oluşan, birbirlerine bağlanma dereceleri zayıf, aşırı derecede kırıklı kaya kütlesi						20 10
 FOLİASYONLU/ LAMİNASYONU/ MAKASLANMIŞ- İnce laminasyonlu veya foliasyonlu, tektonizma ile makaslanmış zayıf kayalar; diğer süreksizlik setlerinden farklı olarak daha egemen olan sık aralıklı sistrozite yüzeyleri kaya kütlelerinde bloklanmanın gelişmesini önlemiştir						5 UYGULANAMAZ
		GSI 80 70 60 50 40 30 20 10 5				

Ilıksu 1 tüneli giriş ve çıkış ağızları boyunca kaya şevlerinde yapılan kinematik analizler sadece düzenli tabakalı ve yapısal kontrollü rekristalize kireçtaşlarına uygulanmış ve sonuç olarak kama tipi ve düzlemsel kayma potansiyelleri belirlenmiştir [14, 15]. Kinematik analiz sonuçlarına göre, kama tipi kayma olasılığı sadece Ilıksu 1 tüneli giriş ağızı kuzey yamacındaki rekristalize kireçtaşlarında (ISK-1); düzlemsel kayma potansiyeli ise Ilıksu 1 tüneli giriş ağızı kuzey yamaç şevinde ve buna karşılık gelen güney yamaç şevindeki rekristalize kireçtaşlarında belirlenmiştir (ISK-1).

Düzenli tabakalı ve yapısal kontrollü rekrystalize kireçtaşları için yapılan kinematik analizlerden sonra, yeraltı su seviyesi ve hidrostatik basınç koşulları da dikkate alınarak bu kaya şevlerinde limit denge analizleri yapılmıştır. Karayolları ve yakınındaki kritik şevler ile kritik mühendislik kazıları (tünel, açık maden işletmeleri, vs.) için yapılan limit denge analizlerinde güvenlik katsayısı (F) genellikle 1.5 olarak alınmaktadır [16, 17]. Bu çalışmadaki limit denge analizleri için de güvenlik katsayısı 1.5 olarak alınmıştır. Kama tipi kaymalar için yapılan limit denge analizleri sonucunda, güvenlik katsayısı 1.5'ten büyük (F=3.05) hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre İlkusu 1 tüneli giriş ağzı kuzey yamaç şevinde kama tipi kayma beklenmemektedir [16]. Düzlemsel kaymalar için uygulanan limit denge analizleri ile güvenlik katsayısı 1.5'ten büyük (Kuzey Yamaç Şev Portalı: F=1.73; Güney Yamaç Şev Portalı: F=1.82 (suya doymun)) bulunmuştur. Bu sonuçlara göre İlkusu 1 tüneli giriş ağzı kuzey ve güney yamaç şevlerinde düzlemsel kayma beklenmemektedir [16].

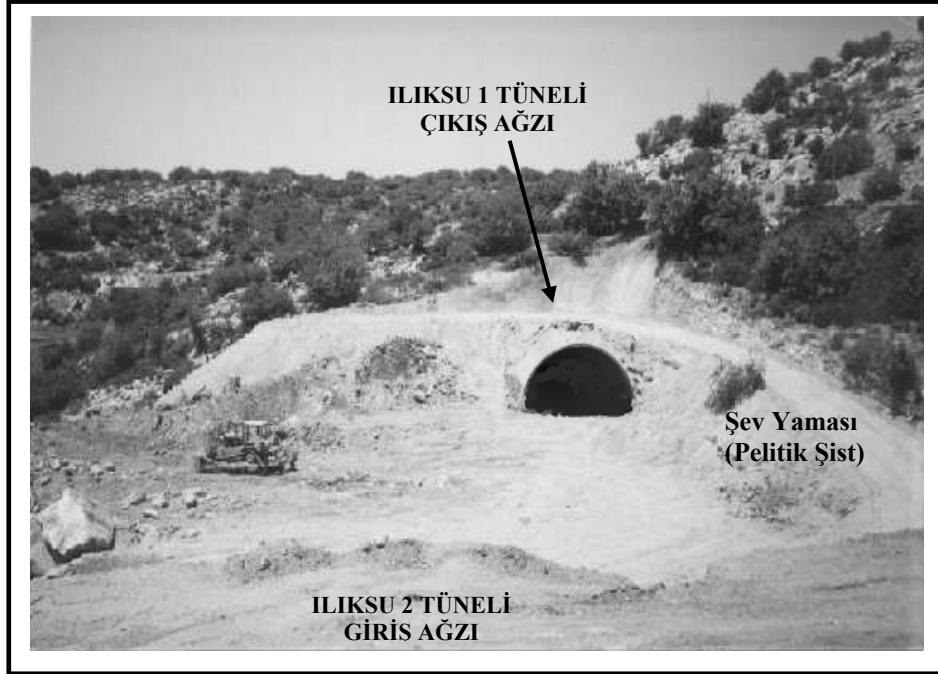
Düzensiz ve gelişigüzel eklemli, aşırı yapraklanmış ve ayrılmış, kil gibi davranan litolojilerin statik duraylılık analizleri, dairesel kayma yöntemi kullanılarak şev duraylılığı paket programı Slope/W [18] ve "phi-c indirgemesi" ile Standart Coulomb" yaklaşımı kullanılarak sonlu elemanlar paket programı PLAXIS 7.2 [19] ile yapılmıştır. Litolojik birimlerin kaya kütle özellikleri Çizelge 4'ten (ISK-5, 6, 7 ve 8) alınmıştır.

Dairesel kayma ve phi-c indirgemesi yöntemleri kullanılarak elde edilen duraylılık analiz sonuçlarına göre, İlkusu 1 tünelinin çıkış ağzı şevinde (pelitik şist), İlkusu 2 tünelinin giriş ve çıkış ağzı şevlerinde (grafit şist ve kalk şist ardalanması) duraylılık problemleri (F < 1.5) gözlenmiştir (Şekil 8). Bu sonuçlar arazi sondajlarından elde edilen litolojik birimlerin kaya kütle özellikleri ile birlikte (ISK 5, 6, 7 ve 8) Çizelge 6'da özetlenmiş ve bu iki analiz sonucundan birer tanesi (İlkusu 1 çıkış ağzı) örnek olarak Şekil 9 ve 10'da gösterilmiştir.

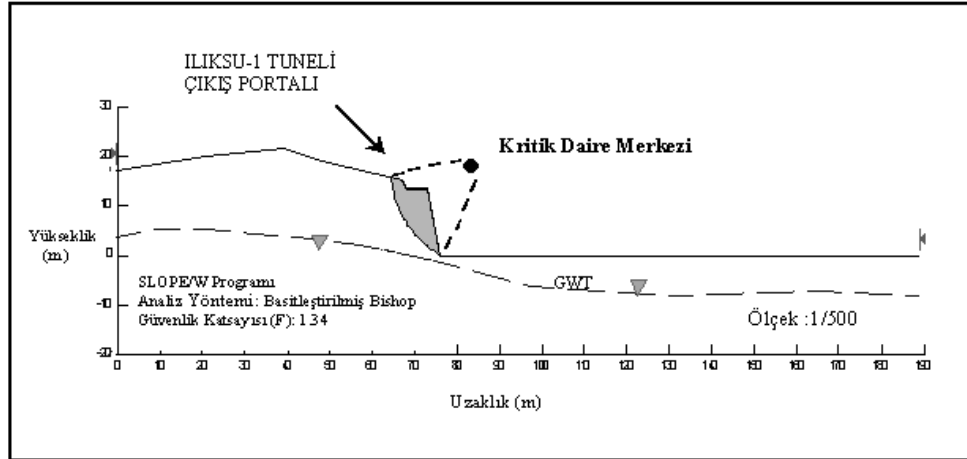
Çizelge 6. İlkusu tünel projesi alın şevleri için yapılan duraylılık analizi sonuçlarının özeti

Kesit	Litholoji	Zayıf kayaç jeoteknik özellikleri	Slope / W (Basitleştirilmiş Bishop) için Güvenlik Katsayısı (F)	PLAXIS 7.2 (Coulomb Yöntemi) için Güvenlik Katsayısı (F)	Duraylılık Durumu (F ≥ 1.5*)
İlkusu-1 Çıkış portalı	Pelitik şist	$\gamma = 26.65 \text{ kN/m}^3$, $\phi = 23^\circ$, $c = 78 \text{ kPa}$	1.34	1.31	duraysız
İlkusu-2 Giriş portalı	Grafit şist, kalk şist, pelitik şist	$\gamma = 25.0 \text{ kN/m}^3$, $\phi = 18^\circ$, $c = 42 \text{ kPa}$	0.99	0.94	duraysız
İlkusu-2 Çıkış portalı	Kalk şist ve grafit şist	$\gamma = 25.0 \text{ kN/m}^3$, $\phi = 22^\circ$, $c = 70 \text{ kPa}$	1.29	1.28	duraysız

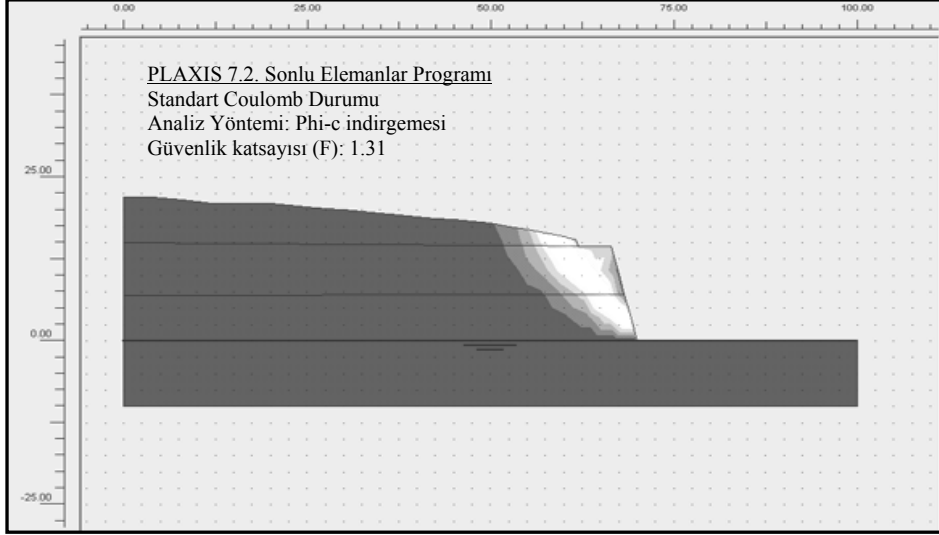
* Not: F ≥ 1.5 duraylı şevi ifade etmektedir [16, 17]



Şekil 8. Ilıksu 1 tüneli çıkış ağzı, ve Ilıksu 1 ve 2 tünelleri arasında kalan yamaç şevlerinin Ilıksu 2 tüneli giriş ağzı üzerinden genel görünümü (Km: 128 + 074)



Şekil 9. Ilıksu 1 tüneli çıkış ağzı alın şevi duraylılık analizi ve bu şevin Slope /W programını kullanarak yapılmış olan dairesel kayma analizi



Şekil 10. Iıksu 1 tüneli çıkış ağızı alın şev duraylılık analizi ve bu şevin PLAXIS 7.2 sonlu elemanlar programı yardımıyla “phi-c indirgemesi” yaklaşımı kullanılarak analizi

Çizelge 6’da belirtilen duraylılık analizlerinin sonuçlarına göre, tünel projesi için tünel bölümlerindeki olası yenilmeleri (dairesel kaymaları) önleyebilmek ve tünel ağızlarının duraylılıklarını sağlayabilmek üzere aşağıdaki destek sistemleri önerilmiştir. Önerilen destek sistemleri uzun vadede duraylılığın sağlanmasına yönelik destek sistemleridir ve Karayolları Genel Müdürlüğü teknik şartnamelerine uyularak belirlenmiştir. Şev yüzeyleri için tavsiye edilen destek sistemleri şunlardır:

- 10 cm püskürtme beton (uygulama: 5+ 5 cm) ve çelik hasır (1 kat)
- kaya bulonu (Φ (çap) = 26 mm, L (uzunluk) = 6.0 m, 1.5 x 1.5 m aralıklı)

Iıksu 1 ve Iıksu 2 tünelleri arasında kalan 81 m uzunluğundaki şev yarması (Km: 128+074 - Km: 128+155) olarak geçilecek kısım düzensiz ve gelişigüzel eklemli, aşırı yapraklanmış ve ayrışmış, kil gibi davranan pelitik şist birimlerinden oluşmaktadır (Şekil 8). Zemin ve topoğrafik koşullar dikkate alınarak güney ve kuzey yamaç şevleri 1/3 (Y:D) olarak belirlenmiştir. Şev yarması boyunca statik duraylılık analizleri için, batıdan doğuya doğru 3 adet en kesit alınmış ve bunlar Slope/W ve PLAXIS 7.2 paket programlarıyla incelenmiştir. Bunlar sırasıyla A Kesiti (Km: 128+080), B Kesiti (Km: 128+110) ve C Kesitidir (Km: 128+140). Bu duraylılık analizi sonuçları sondajlardan elde edilen pelitik şistlerin kaya kütlesi özellikleri ile birlikte (ISK 5 ve ISK 8) Çizelge 7’de özetlenmiş ve bu iki analiz sonucundan birer tanesi (A Kesiti) örnek olarak Şekil 11 ve 12’de verilmiştir.

Güvenlik katsayısı değerlerine göre farklı yöntemler kullanarak yapılan şev duraylılık analizleri birbirlerine çok yakın ve uyumlu sonuçlar vermektedir. Çizelge 7’de belirtilen duraylılık analizleri sonuçlarına göre 81m’lik şev yarması boyunca dayanıklı ve dayanıksız bölgelerin olduğu belirlenmiştir. Duraylılık doğudan batıya doğru azalmakta ve bu üç kesitten iki tanesinde yenilme gözlemlenmektedir ($F < 1.5$). Bundan ötürü, uzun vadede

Ilıksu Tünellerinin Jeoteknik Değerlendirmesi

olası yenilmeleri önleyebilmek ve şev duraylılığını sağlayabilmek üzere aşağıdaki destek sistemleri Karayolları Genel Müdürlüğü teknik şartnamelerine uygun olarak önerilmiştir:

- 15 cm püskürtme beton (uygulama: 5+10 cm) ve çelik hasır (1 kat)
- kaya bulonu (Φ (çap) = 26 mm, L (uzunluk) = 6.0 m, 1.5 x 1.5 m aralıklı)

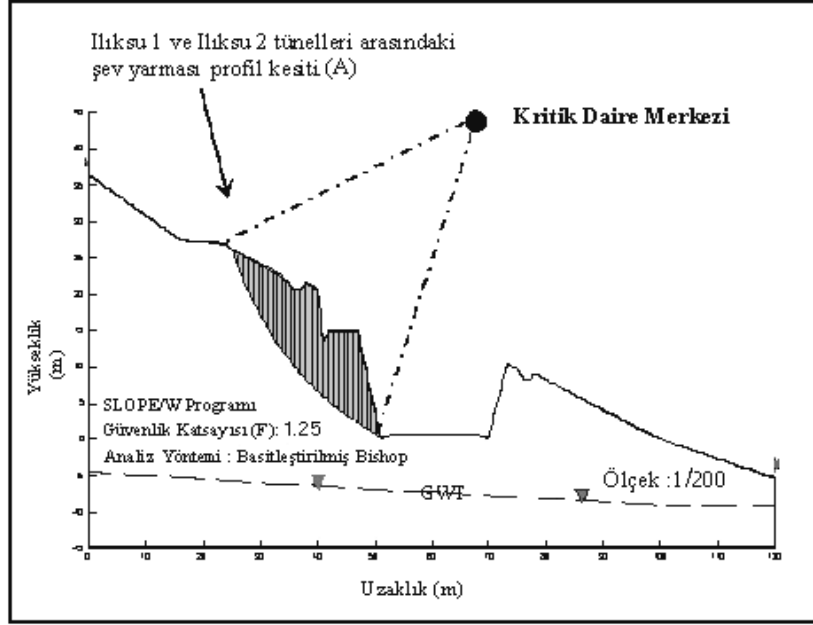
Bunun yanında boşluk suyu basıncının ve su seviyesinin yükselerek uzun vadede şev duraylılığına zarar vermesini önlemek amacıyla uygun yüzey drenaj sistemleri (yüzey ve kollektör drenaj sistemleri, vs.) ve yeraltı drenaj sistemleri (yatay drenaj, dikey drenaj kuyuları veya boşaltma tünelleri, vs.) düzenli bir biçimde uygulanmalıdır.

Çizelge 7. Şev Yarmaları boyunca her en kesiti için yapılan duraylılık analizi sonuçlarının özeti (Kesit A, B ve C)

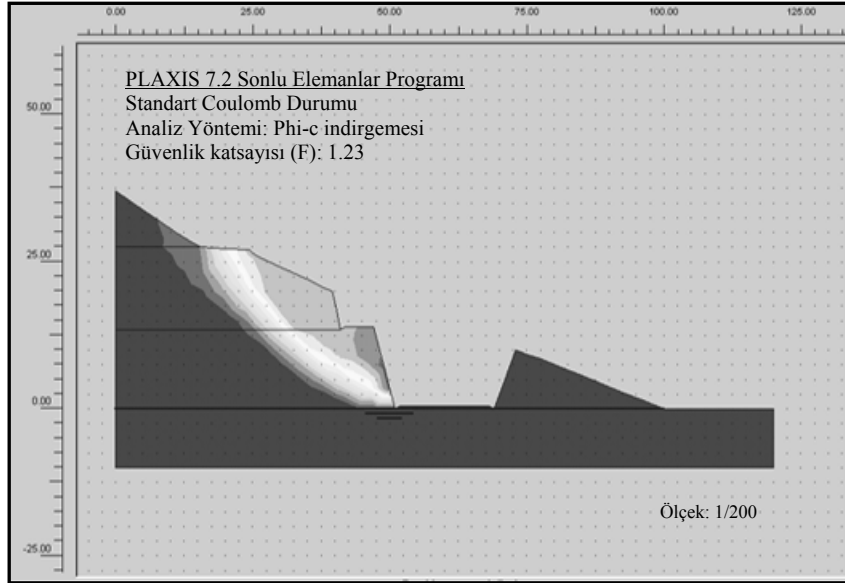
En Kesit	SLOPE/ W için Güvenlik katsayısı (F) (Basitleştirilmiş Bishop)	PLAXIS 7.2 için Güvenlik katsayısı (F) (Phi-c indirgemesi)	Duraylılık Durumu ($F \geq 1.5^*$)
A	1.25	1.23	duraysız
B	1.49	1.45	duraysız
C	1.75	1.71	duraylı

* Not: $F \geq 1.5$ duraylı şevi ifade etmektedir [16, 17]

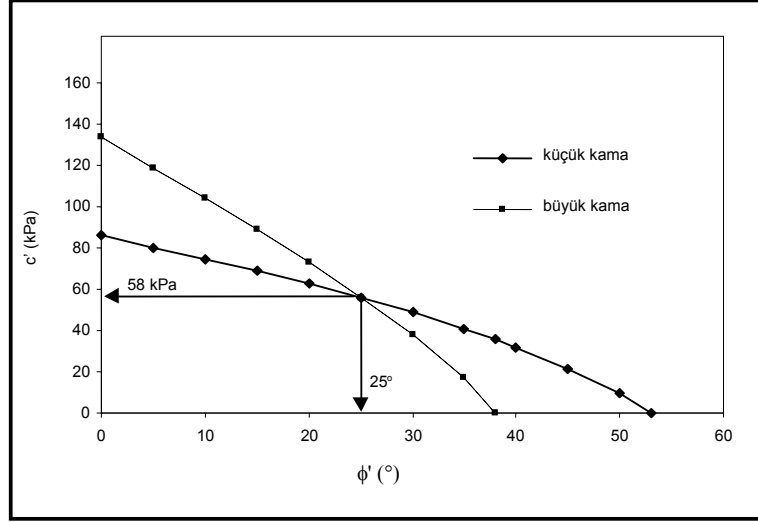
Antalya-Alanya Devlet Yolu 4. Kısım Karayolu inşaat çalışmaları, daha önceden de belirtildiği gibi bu karayolunun geliştirilmesi ve genişletilmesi kapsamında karayolu inşaatı, viyadük ve tünel çalışmalarını içine almaktadır. Bu çalışmalardan biri de Ilıksu 1 tüneline yaklaşık 1 km uzaklıkta, Km: 126+449 ve 126+700'leri arasındaki yapıyı tamamlanmış olan Çandırtepe tüneline. Tünel yapımı çalışmaları esnasında bu tüneline kuzey yamacındaki giriş ağzında yetersiz destek sistemlerinin kullanılması ve tünel ağzı kazısı esnasındaki gerilim boşalması sebebiyle tünel kazısının durmasına sebep olacak ölçekte şev kayma yüzeyleri oluşmuştur. Çandırtepe tüneline ve çevresindeki bu kayma yüzeylerinin gözlemlendiği litolojik birimler kalk şistlerdir. Bu bölgedeki kalk şistler genelde düzenli tabakalı, yapısal kontrollü olup Ilıksu tünellerinde (özellikle Ilıksu 2) olduğu gibi gelişigüzel eklemlili, aşırı yapraklanmış ve ayrılmış, kil gibi davranan litolojilerle (grafit şist ve pelitik şist) çok yoğun ardalanmalı ve arakatlı değildir. Çandırtepe tüneline tünel giriş ağzında gözlemlenen bu kayma yüzeyleri birbirleri ile içiçe geçmiş iki adet kama tipi kaymadan oluşmaktadır. Bu kamalardan biri bütün kayma yüzeyini kontrol etmekte, diğeri ise bu büyük kaymanın içerisinde lokal olarak gelişmiş diğeri bir kama tipi kayma düzlemidir. Bu sebeplerle, kaya gibi davranan birimlerdeki bu kaymalarda, kayma mukavemeti parametrelerini (c' ve ϕ') belirlemek üzere geriye dönük analizler, limit denge koşullarını sağlayan ($F = 1.0$) c' ve ϕ' parametrelerinin ortaklaşa kullanılması ile elde edilen eğrilerden yararlanılarak elde edilmiştir [16]. Bu çalışmalar sonucunda kayma mukavemeti parametreleri, $c' = 58$ kPa ve $\phi' = 25^\circ$ olarak bulunmuştur (Şekil 13).



Şekil 11. Ilıksu 1 ve Ilıksu 2 tünelleri arasındaki şev yarması profil kesitinin (A) Slope/W programı kullanılarak yapılan duraylılık analizi



Şekil 12. Ilıksu 1 ve Ilıksu 2 tünelleri arasındaki şev yarması profil kesitinin (A) PLAXIS 7.2 sonlu elemanlar programı kullanılarak yapılan duraylılık analizi



Şekil 13. Kalk şistte geriye dönük şev analizi

Ilıksu tünelleri proje alanındaki kalk şistler yukarıda da belirtildiği gibi genelde gelişigüzel eklemli, aşırı yapraklanmış ve ayrılmış, kil gibi davranan grafit şist ve pelitik şistlerle araldanmalı ve arakatlıdır. Bu nedenle bozunmamış (intact) RQD, zemin mukavemet ve dayanıklılık parametrelerinin genelde yüksek olmasına karşın, kaya kütlelerinin pelitik ve grafit şistlerle araldanmalı yapısı nedeniyle Ilıksu tünelleri boyunca yapılan sondajlarda ve laboratuvar deneylerinde düşük kaya kalitesi sonuçlarına rastlanılmıştır. Yapılan bu çalışmalardan elde edilen kayma mukavemeti parametreleri düşük olup grafit şistler için elde edilen kayma mukavemeti parametrelerine çok yakındır. Proje dahilinde bu bölgede yapılan çalışmalarda Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) sonuçlarına göre (Çizelge 4), kalk şistlerin kayma mukavemeti dayanımı parametreleri değer aralıkları kohezyon için (c') 40-80 kPa ve içsel sürtünme açısı için (ϕ') 18-22.5° olarak belirlenmiştir.

Yapılan bu çalışmalara göre GSI metodu ile elde edilen kayma mukavemeti parametrelerinin, geriye dönük analizler sonucunda elde edilen kayma mukavemeti parametreleri ile çok uyumlu olduğu görülmüştür. Geriye dönük analizler sonucunda elde edilen parametrelerden içsel sürtünme açısı değeri GSI metodu ile elde edilen içsel sürtünme açısı değer aralığı ile karşılaştırıldığında bu aralığın biraz dışına çıkmaktadır. Buna rağmen, Çandırtepe tüneli ve çevresindeki kalk şistlerin, Ilıksu tünellerinde olduğu gibi gelişigüzel eklemli, aşırı yapraklanmış ve ayrılmış, kil gibi davranan litolojilerle çok yoğun araldanmalı ve arakatlı olmamaları nedeniyle bu sonuç şaşırtıcı değildir. Geriye dönük analizler ile elde edilen kayma mukavemeti parametreleri sonuçlarına göre, Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) ile edilen kayma dayanımı parametrelerinin özellikle zayıf ve çok zayıf kalitedeki kaya kütleleri için güvenilir ve tatmin edici sonuçlar verdiği söylenebilir.

7. ÇALIŞMA ALANINDAKİ YERİNDE VE İKİNCİL GERİLME ANALİZLERİ

Bu bölümde, ilgili jeoteknik ve jeomekanik parametreler (kayma dayanımı, elastisite modülü, Poisson oranı, genişleme açısı) kullanılarak tünel kazısı esnasındaki yerinde (in-

situ), ikincil gerilme dağılımları ve tünel etrafındaki deformasyonlar ve kaya kütleleri ile örtüşen uygun destek sistemleri sonlu elemanlar (finite element) yöntemiyle incelenmiştir. Bu amaçla, “Phase²” (Plastic Hybrid Analysis of Stress for Estimation of Support) [20] sonlu eleman paket programı kullanılmıştır. Bu program “Hybrid Elemanlar Yöntemi” (Sınır Elemanlar ve Sonlu Elemanlar Yönteminin Karimasından oluşan sayısal yöntem) ile modellenen tünel-zemin sisteminde, aşamalı kazı ve destekleme yöntemine uygun olarak değişen ardışık gerilme dağılımlarının incelenmesine olanak sağlamaktadır. Tünel projesi sırasında kullanılan destek sistemleri ile jeoteknik ve jeomekanik parametreler Çizelge 3 ve 4’ teki verilerden yararlanılarak en güvenli yönde seçilmiştir.

Tünel kazıları aşaması ve destek sistemi uygulaması sırasında meydana gelebilecek en elverişsiz durumlarla karşı karşıya kalınacağı hesaba katılmış ve modellemeler buna göre yapılmıştır. Genişliği 10 m ve yüksekliği 7.5 m olan tünellerin, “flüt yapısı” şeklinde [7] ve tek tüp olarak inşa edileceği tasarlanmıştır. Tünel derinliğinin sığ olması ve deformasyon modülünün 0.3 GPa ile 12.5 GPa arasında olması nedeniyle tünel zemininde yerindeki yatay gerilmenin (σ_h) düşey gerilmeye (σ_v) oranı (k) 3 olarak belirlenmiştir [21].

Çizelge 3’te belirtildiği gibi tünel kazısı üst ve alt yarı kazıları olarak iki aşamada düşünülmüştür. Bu düzenlemeler göz önüne alınarak “Phase²” programı ile yapılan tünel modellemesi 4 ayrı aşamayı içerir. İlk aşamada tünel kazısına başlamadan başlangıç gerilme durumu, kayanın örtü ağırlığı ve belli bir yanal basınç hesaplanmıştır. Sonraki iki aşamada ise (önce üst, sonra alt yarı için) kazı yapıldıktan sonra tünel etrafında gelişen temel gerilme dağılımları (σ_1, σ_3), yenilme noktaları (makaslama (shear) ve çekme gerilimi (tension)) ve ikincil deplasmanlar belirlenmiş; son aşamada ise tünel kazısı yapıldıktan sonra kaya kütlelerine uygulanan destek sistemlerinin etkileri hesaplanmıştır (Şekil 14).

Tünel zeminlerinin en elverişsiz zemini olan çok zayıf kalitedeki kaya kütleleri için yapılmış olan modellemeler aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Bu modellemeler için Çizelge 3 ve 4’ten yararlanılmış (ISK-8) ve çok zayıf kalitedeki kaya kütlelerinin yenilme sonrası davranışları plastik olarak değerlendirilmiş ve Hoek-Brown yenilme ölçütleri kullanılmıştır. Bu kaya kütlelerinin modellenmesi sonucunda oluşan ikincil deplasman dağılımları ve yenilme bölgeleri (üçüncü aşama) Şekil 15(a)’da gösterilmiştir.

Çok zayıf kalitedeki kaya kütlelerinin modellemelerinde kullanılan destek sistemleri ve bunların jeomekanik özellikleri Çizelge 3 ve 4’ te verilmiş olup, öngörülen bu destek sistemlerinin uygulanabilirliğini kontrol etmek amacıyla “Phase²” sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Destek sistemleri için Karayolları Genel Müdürlüğü NATM Uygulamalı Yeraltı Tünel İşleri Teknik Şartnamesi’nden [7] ve Hoek ve Brown [22]’den yararlanılmıştır.

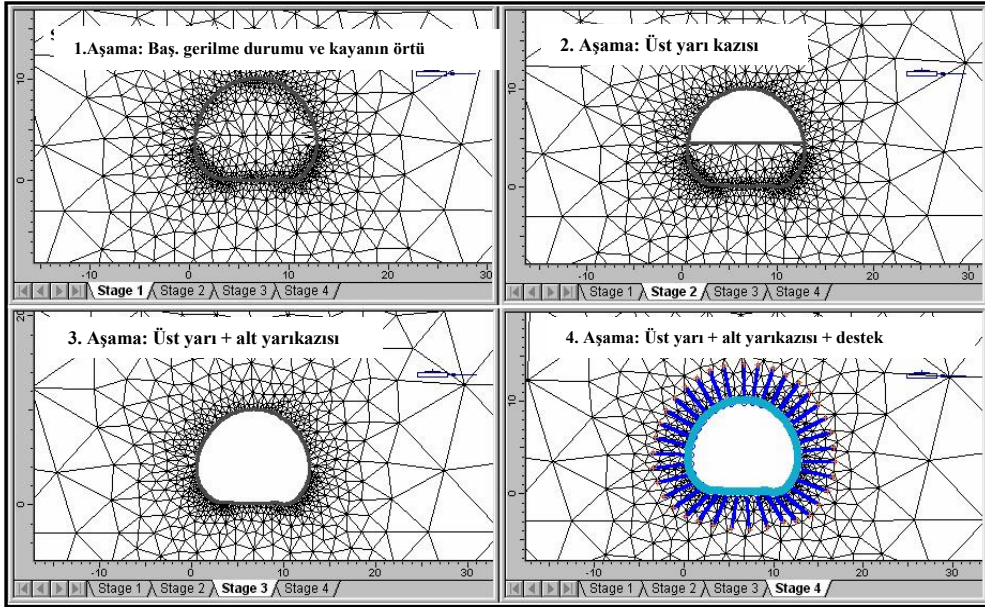
Çok zayıf kalitedeki kaya kütlelerinin modellemelerinde destek sistemlerinin yerleştirilmesinden sonra oluşan ikincil deplasman dağılımları, δ_t (mm) ve yenilme bölgeleri (dördüncü aşama) Şekil 15(b)’de gösterilmiştir. Destek sistemlerinin yerleştirilmesinden sonra, toplam ikincil deplasmanlar, destek sistemi kullanmadan önceki aşamaların üçte birine düşmüş ve yenilme bölgeleri gözle görülür bir biçimde azalmıştır.

- Destek sistemleri kullanılmadan önceki toplam ikincil deplasman δ_t : 135 mm
- Destek sistemleri kullanıldıktan sonraki toplam ikincil deplasman δ_t : 46 mm

Bu hesaplamalar ışığında çok zayıf kalitedeki kaya kütleleri (Iİksu 2 giriş ve çıkış ağzları) için belirlenen destek sistemlerinin yeterli ve uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

İlksu Tünellerinin Jeoteknik Değerlendirmesi

Tünel zeminlerinin portal ve portallara yakın kesimlerdeki davranışları üç boyutludur. Ancak “Phase²” tünel programı iki boyutlu analiz yapmakta olup “düzlemsel bozunum” esasına dayanmaktadır. Bu nedenle tüneldeki üç boyutlu davranışı hesaba katmak ve iki boyutlu analiz sonuçlarında ortaya çıkan birtakım bilinmeyenleri de hesaba katmak için kazı yapılan bölgedeki bazı kaya kütlesi dayanımı parametreleri (elastik modül, kaya kütlesi basma dayanımı, vs.) belli oranlarda azaltılmıştır. Böylece tünel kazısının neden olduğu gevşemelerin de göz önüne alınması sağlanmaktadır. Bu parametreleri belirlerken çok dikkatli davranılmalı ve tünel modellemesinin mümkün olduğunca doğal zemin koşullarını yansıtmayı sağlanmalıdır. Bu nedenle tünel kazısı yapılırken yerinde arazi deneyleri yapılarak tünel çevresindeki gerilme dağılımlarının büyüklüklerinin belirlenmesi, tünel projesi açısından hayati önem arzeder.

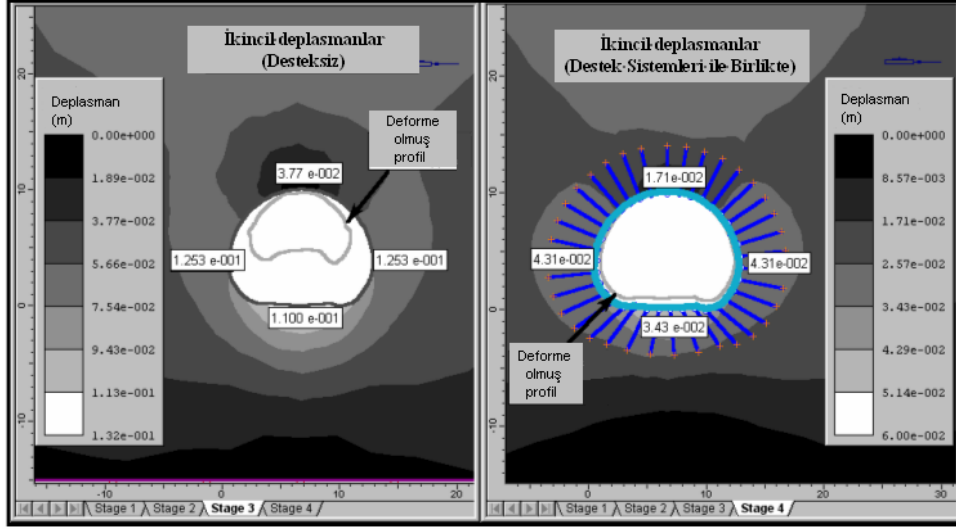


Şekil 14. “Phase²” programı ile yapılan ve 4 ayrı aşamayı içeren tünel modellemesi

8. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışmanın amacı, kaya malzemelerinin ve kaya kütlelerinin mühendislik jeolojisi ve jeoteknik özelliklerinin incelenmesi ve İlksu 1 ve İlksu 2 tünelleri boyunca uygun destek sistemleri ve duraylılık yöntemlerinin önerilmesinden oluşmaktadır. Yapılan çalışmalar kapsamında ayrıntılı mühendislik jeolojisi ve jeolojik haritalama, zemin sondaj çalışmaları, yerinde ve laboratuvar deneyleri, jeoteknik parametrelerin hesaplanması ve bunların yorumlanmasından elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Proje alanının zeminini oluşturan başlıca kayalar Asmaca ve Cebireis Formasyonu üyesi rekristalize kireçtaşı, kalk şist, pelitik şist, grafit şist ve bu birimlerin ardalanmalarından oluşmuştur. Bu birimlerin mühendislik jeolojisi ve jeomekanik özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir.



(a) Üçüncü Aşama

(b) Dördüncü Aşama

Şekil 15. Iıksu 2 tüneli ağızları toplam ikincil deplasmanlarının δ_i (mm) ve yenilme bölgelerinin (a) destek sistemleri kullanılmadan önceki; (b) destek sistemleri kullanıldıktan sonraki dağılımı

Zeminlerin jeolojik modelinin oluşturulması ve tünel tasarımı için gerekli jeomekanik parametrelerin belirlenmesi amacıyla Iıksu 1 ve Iıksu 2 tünelleri boyunca proje alanındaki sekiz sondaj kuyusunda yaklaşık 302 m karotlu zemin sondajı, yerinde arazi deneyleri ve bu sondajlardaki litolojileri temsil eden karot numuneleri üzerinde jeomekanik laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmaların yanısıra, proje alanında detaylı jeolojik ve jeoteknik çalışmalar (hat etüdüleri, süreksizlik ölçümleri, kinematik analizler, v.b.) yapılmış ve kaya kütlelerinin mühendislik jeolojisi parametreleri belirlenmiştir.

Tünellerin zeminlerini oluşturan kaya kütleleri Q-Sistemi, RMR ve NATM'a göre sınıflandırılmış olup tünellerin projelendirilmesinde ve yapımında bu üç sınıflandırma sisteminin ilkeleri esas alınmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda her üç sınıflandırma sistemi için destek tipleri, destek kategorileri ve duraylılık teknikleri belirlenmiştir. Kaya kütlelerinin dayanımlarının, deformasyon özelliklerinin (özellikle zayıf kalitedeki kaya kütlelerinin) ve kayma dayanımı parametrelerinin güvenilir bir biçimde belirlenebilmesi için Hoek-Brown güncelleştirilmiş ve basitleştirilmiş yenilme ölçütü kullanılmış, proje alanındaki her sondaj bölümü için kaya kütlesi kalitesine göre Jeolojik Dayanım İndeksi değer aralığı ve deformasyon modülü saptanmıştır.

Çalışma alanındaki tünellerin giriş ve çıkış ağızları ile birlikte yaklaşım bölümlerinde ve iki tünel arasında kalan ve şev yarması olarak geçilecek bölümde şev duraylılık ve stabilite analizleri yapılmıştır. Düzenli tabakalı kaya şevleri için yapılan kinematik analizler ve limit denge analizleri sonucunda düzenli tabakalı rekristalize kireçtaşlarında (Iıksu 1 tüneli giriş ağızı kuzey ve güney yamaç şevlerinde) düzlemsel ve kama tipi kaymalar beklenmemektedir. Gelişigüzel eklemli, aşırı yapraklanmış ve ayrılmış, kil gibi davranan litolojilerde, Iıksu 1 tünelinin çıkış alın şevi ağızında (pelitik şist), Iıksu 2 tünelinin giriş ve

İlksu Tünellerinin Jeoteknik Değerlendirmesi

çıkış ağızları alın şevlerinde (grafit şist ve kalk şist ardalanması) ve İlksu 1 ve İlksu 2 tünelleri arasında kalan 81m uzunluğundaki şev yarması olarak geçilecek kısımda (pelitik şist) dairesel kayma yöntemi kullanılarak paket programlar yardımıyla elde edilen sonuçlara göre duraylılık sorunları gözlenmiş ve tünel projesi için tünel bölümlerindeki olası yenilmeleri (dairese kaymaları) önleyebilmek ve tünel ağızlarının duraylılıklarını sağlayabilmek üzere gerekli destek sistemleri önerilmiştir. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) metodu ile elde edilen kayma mukavemeti parametrelerinin güvenilirliğini kontrol etmek amacıyla, çalışma alanında kama tipi kayma yüzeyleri gözlenen kalk şistlerde geriye dönük analizler yapılmış ve yapılan bu analizler sonucunda, GSI ile edilen kayma dayanımı parametrelerinin özellikle zayıf ve çok zayıf kalitedeki kaya kütleleri için güvenilir ve tatmin edici sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Çalışmanın sonucunda ilgili jeoteknik parametreler kullanılarak, tünel kazısı sırasında yerinde ve ikincil gerilmeler ve tünel etrafındaki deformasyonlar çok zayıf kalitedeki kaya kütleleri için değerlendirilmiş ve ampirik yöntemler ile belirlenen tünel destek sistemleri sonlu elemanlar yöntemiyle kontrol edilmiştir. Destek sistemlerinin yerleştirilmesinden sonra, ikincil deplasmanlar, destek sistemi kullanmadan önceki aşamalara göre önemli ölçüde azalmış (üçte birine düşmüş) ve yenilme bölgeleri azalmıştır. Bütün bu hesaplamalar ışığında, çok zayıf kalitedeki kaya kütleleri için önerilen destek sistemlerinin yeterli ve uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

9. TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde sağladığı destek için Sayın Hasan Özasan'a ve Yüksel Proje Uluslararası A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

10. SEMBOLLER

a	: Hoek-Brown sabiti
c'	: Kohezyon dayanımı, MPa
E	: Elastik modül, MPa
E _m	: Deformasyon modülü, MPa
F.S.	: Güvenlik katsayısı
GSI	: Jeolojik Dayanım İndeksi, MPa
k	: σ_h / σ_v
L	: Bulon uzunluğu, m
m _b	: Hoek-Brown kaya kütlesi sabiti
m _i	: Hoek-Brown kaya sabiti
s	: Hoek-Brown sabiti
Φ	: Bulon çapı, mm
δ_t	: İkincil deplasman, mm
ϕ'	: içsel sürtünme açısı, derece
γ	: Birim hacim ağırlık, kN/m ³
ν	: Poisson oranı
σ_{ci}	: Örselenmemiş kaya kütlesi için tek eksenli basma dayanımı, MPa
σ_{cm}	: Kaya kütlesi basma dayanımı, MPa
σ_h	: Yerinde (in situ) yatay gerilme, MPa

- σ_v : Yerinde (in situ) düşey basınç, MPa
 σ_{tm} : Kaya kütlesi çekme dayanımı, MPa
 σ_1 : Büyük asal gerilme, MPa
 σ_3 : Küçük asal gerilme, MPa

Kaynaklar

- [1] Yüksel Proje Uluslararası A.Ş., “İlksu Tünelleri Ön Proje Jeoteknik Raporu”, Cilt 1, TC Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2000.
- [2] Özgül, N., “Alanya Tectonic Window and Geology of its Western Part”, Türkiye Jeoloji Kurumu Ketin Symp., Ankara, 1984.
- [3] Okay, A. I., and Özgül, N., “HP/LT Metamorphism and the Structure of the Alanya Massif”, Geological Evolution of the Eastern Mediterranean (Edited by Dixon, J.A., Robertson, A.H.F.). London, Blackwell, 1984.
- [4] I.S.R.M., “Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses”, Rock Characterization, Testing and Monitoring, London, Pergamon Press, Oxford, 1981.
- [5] Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., “Estimation of Support Requirements for Underground Excavations”, Proceedings 16th Symposium on Rock Mechanics, Minneapolis, USA, 1977.
- [6] Bieniawski, Z. T., “Engineering Rock Mass Classification”, Balkema, Cape Town, 1989.
- [7] Karayolları Genel Müdürlüğü, “NATM Uygulamalı Yeraltı Tünel İşleri Teknik Şartnamesi”, 1997.
- [8] Hoek, E., and Brown, E.T., “Empirical Strength Criterion for Rock Masses”, ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division, 106 (GT9), 1013-1035, 1980.
- [9] Hoek, E., Wood, D., and Shah, S., “A Modified Hoek-Brown Criterion for Jointed Rock Masses”, ISRM Symposium: Eurock 92- Rock Characterization, J. A. Hudson (ed.), Thomas Telford, 209-213, 1992.
- [10] Hoek, E., and Brown, E.T., “Practical Estimates of Rock Mass Strength”, International Journal of Rock Mechanic and Mining Sciences, 34 (8), 1165-1186, 1997.
- [11] Hoek, E., Marinos, P., and Benissi, M., “Applicability of the Geological Strength Index Classification for Very Weak and Sheared Rock Masses”, Bulletin Engineering Geology & Environment, 57, 151-154, 1998.
- [12] Marinos, P.G. and Hoek, E., “GSI: “A Geological Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation”, Proceedings of the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering (GeoEng 2000), Technomic Publishing Co. Inc., Melbourne, Australia, 1422-1440, 2000.
- [13] Serafim, J.L., and Pereira, J.P., “Consideration of the Geomechanical Classification of Bieniawski”, Proc. Int. Symp. on Engineering Geology and Underground Construction, Lisbon 1(II), 1983.
- [14] Goodman, R.E., “Introduction to Rock Mechanics”, Second Edition, New York, John Wiley & Sons, 1989.

Ilksu Tünellerinin Jeoteknik Değerlendirmesi

- [15] Diederichs, M.S., and Hoek, E., “DIPS, Data Interpretation Package Using Stereographic Projection”, Rock Eng. Group, Department of Civil Eng., University of Toronto, 1989.
- [16] Hoek, E., and Bray, J.W., “Rock Slope Engineering”, Institution of Mining and Metallurgy, Third Edition, London, Stephen Austin and Sons Ltd., 1981.
- [17] Karayoları Genel Müdürlüğü, “Şev Stabilitesi Uygulamaları Teknik Şartnamesi”, 1989.
- [18] Geo Slope International Ltd, “Slope/W Software”, Calgary, Alberta, Canada, 1999.
- [19] PLAXIS B.V., “Plaxis Software Version 7.2.”, P.O. Box 851, 3160 AB RHOON, Netherlands, 2001.
- [20] Rocscience Inc., “Phase² User’s Guide”, Toronto, Ontario, Canada, 2001.
- [21] Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F., “Support of Underground Excavations in Hard Rock”, Rotterdam, Brookfield, A.A. Balkema, 1995.
- [22] Hoek, E., Brown E.T., “Underground Excavations in Rock”, The Institution of Mining and Metallurgy, London, Stephen Austin and Sons Ltd., 1980.