



Zonguldak-Üzülmez Tünellerinin Çevre Kaya Özelliklerinin Belirlenmesi ve Duraylılığının Değerlendirilmesi

Determination of Rock Mass Properties and Stability Assessment of Üzülmez Tunnels, Zonguldak

Melih Geniş^{1*}, Zeynel Derin²

¹Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

²Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, Türkiye

Öz

Zonguldak ilini Ankara'ya bağlayan devlet karayolu güzergahının çift yönlü olması için çalışmalar devam etmektedir. Bu amaçla günümüzde hizmet veren Sapça tüneline paralel yeni tüp ve Üzülmez tünellerinin kazı çalışmaları tamamlanmıştır. Üzülmez tüneli güzergahı boyunca seçilen bölgeler için duraylılık değerlendirmesi yapılmıştır. Kaya malzemesinin dayanım ve deformasyon özellikleri laboratuvar çalışmaları ile bulunmuştur. RMR ve Q kaya kütleli sınıflama sistemleri kullanılarak kaya kütleli puanları tespit edilmiştir. Sonra kaya kütleli ilişkin dayanım ve deformasyon özellikleri çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen görgül eşitlikler yardımıyla belirlenmiştir. Elde edilen veriler, iki boyutlu sonlu elemanlar çözümleme yöntemlerini esas alan bilgisayar programlarında kullanılarak yerdeğiştirme miktarları, açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgeleri belirlenmiştir. Ayrıca tünel kazısının çeşitli aşamalarında uygulanan tahkimatın duraylılığı da değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Duraylılık, Sayısal çözümler, Tünel

Abstract

The studies about extension to double roadway of existing state roadway from Zonguldak to Ankara has been continued. In this purpose, excavations of tunnel tube parallel of existing Sapça Tunnel and Üzülmez tunnels have just been completed. Stability assessment for selected regions along the Üzülmez tunnels route were performed. Strength and deformation properties of rock material by laboratory studies were obtained. Rock mass ratings were estimated by RMR and Q rock mass classification systems. Then, strength and deformation properties of rock mass is obtained by using empirical equations proposed by various researchers. Displacement and failure zones around openings were calculated by using obtained data into two dimensional computer code based finite element method. Furthermore, support stabilities at the different stages of excavation were evaluated.

Keywords: Stability, Numerical analyses, Tunnel

1. Giriş

Ülkemizde başta madencilik, ulaştırma, hidroelektrik santralleri olmak üzere değişik amaçlı yeraltı açıklığı kazıları yapılmaktadır. Özellikle ulaştırma alanında yapılan yeraltı kazılarının başında metro, karayolu ve demiryolu tünelleri gelmektedir. Özellikle arazi topografyasının fazla eğimli olduğu Karadeniz Bölgesinde karayolları ağında güvenli trafiğin sağlanması amacıyla tünel ve viyadük yapımı kaçınılmaz hale gelmiştir. Zonguldak merkezde yapımı devam eden 3 adet tünel ve projelendirme aşamasında birkaç tünel

bulunmaktadır. Tünel çalışmaları kazı ve tahkimat aşamalarından oluşup uygun kazı yöntemleri ve tahkimat sistemlerinin tasarımı proje aşamasında yapılmaktadır. Özellikle proje aşamasında kaya kütleli özelliklerinin doğru bir şekilde tanımlanmaması tünel kazısı sırasında bazı öngörülmeyen duraysızlık problemlerini oluşturarak proje maliyetlerini etkileyebilmektedir. Ayrıca kazı yöntemlerinin doğru seçilmesi de tünel açma süreleri ve maliyetleri üzerinde olumlu etkileri olacağı kaçınılmazdır. Bu amaçla yöremizde kazı işlemi henüz tamamlanan Üzülmez tünellerinin açıldığı geçkide bulunan kaya malzemesi ve kütleli özellikleri belirlenmiş ve söz konusu tünelin seçilen iki kesitinde duraylılık değerlendirmeleri yapılmıştır.

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: genis@beun.edu.tr

2. Jeoloji

Üzülmöz Tünelleri geçkisi ve yakın çevresinde Karbonifer (Namuriyen) yaşlı Alacağzı Formasyonu yüzeylenmektedir. Alacağzı formasyonu kömür damarlı şeyl, çamurtaşı ve kumtaşları, yeşil, kirlili sarı, siyah renkli, kumtaşı-silttaşı-kiltaşı ardalanmasından oluşmaktadır. Üzülmöz dolayında 5 m'ye kadar ulaşan denizel girdiler (karbonatlı) gözlenmektedir. Birim, sıklaşma ve karasallaşma sürecinin ilk belirtilerini gösterir. Yanal uzanımları fazla olmayan bir özellik gösteren, delta düzlüğü çökelleri olarak izlenmektedir. Alacağzı Formasyonu, Zonguldak ve batısındaki mostralarda tektonik nedenlerle daha aktif alanlarda daha şistli yapıda görülür. Kumtaşları, kilttaşları ve silttaşları genellikle killi-karbonatlı bir çimento ile tutturulmuş olup hava ile temasta birim kolaylıkla dağılgandır. Kilttaşı, laminalanma ile 1-3 cm katmanlanma göstermesine karşın, silttaşları 5-20 cm, kumtaşları ise 10 cm ile 2 m arasında değişen tabakalanmalar göstermektedir (Anon, 2011).

3. Kaya Malzemesi ve Kütlesi Özelliklerinin Belirlenmesi

Üzülmöz tünellerinde genel olarak Namuriyen serisindeki boyları 10 cm ve 150 cm arasında kömür damarlarından ve kömür yan kayaçlarından biri olan kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ardalanmalı birimler ile karşılaşmıştır. Tünel geçkisi üzerinde bu birimlerden en çok karşılaşılanı kumtaşı-silttaşı ardalanmasıdır. Ardalanmalar 5 cm ile 1 m arasında değişim

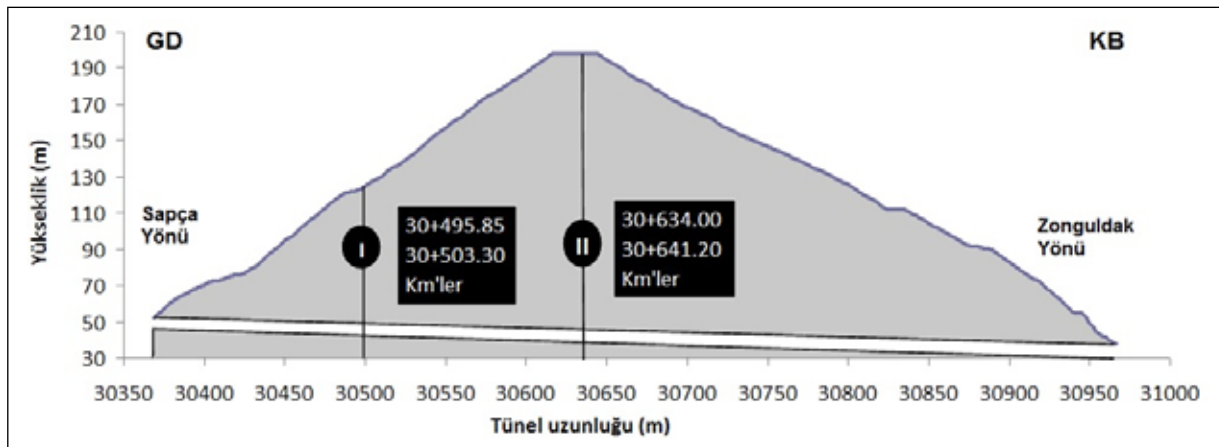
göstermektedir. Kaya birimlerinin net ayrımı çoğu bölgelerde yapılamamıştır. Tünel geçkisi üzerinde farklı mesafelerden alınan ardalanmalı kaya bloklarından elde edilen karot örnekleri (NX çaplı) ile Uluslararası Kaya Mekanik Birliği (ISRM) tarafından önerilen yöntemlere uygun (ISRM 2007) olarak tek eksenli basınç, dolaylı çekme ve deformabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Laboratuvarında elde edilen kaya malzemesi dayanımlarından en küçük ve en büyük dayanım değerleri göz ardı edildiğinde elde edilen ortalama tek eksenli basınç dayanımı değeri 70.5 ± 25 MPa olarak bulunmuştur. ISRM (2007) tek eksenli basınç dayanımı sınıflamasına göre «Yüksek» dayanımlı sınıfta yer almaktadır. Dolaylı çekme dayanımı 9.67 ± 3.50 MPa, Young Modülü ise 18.3 ± 2.8 GPa ve kuru birim hacim ağırlığı ise 26 ± 0.8 kN/m³ olarak hesaplanmıştır.

Tünel geçkisi boyunca biri en fazla örtü yüksekliğinin bulunduğu iki farklı derinlik için seçilen iki ayrı kesitte (Şekil 1), kaya kütlesi özelliklerini belirlemek için Kaya Kütlesi İndeksi (Jeomekanik Sınıflama) (Rock Mass Rating, RMR) (Bieniawski 1989) ve Tünelcilik Kaya Kalitesi (Q) (Barton vd. 1974; Grimstad ve Barton 1993) sınıflama sistemleri kullanılmıştır. Elde edilen puanlama değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Kaya kütlesinin dayanım deformasyon özelliklerinin yerinde (arazide) yapılan deneylerle belirlenmesi zaman alıcı ve maliyeti yüksek çalışmalardır. Genellikle tünel projelendir-

Çizelge 1. Kaya kütlesi puanları.

Kaya Kütlesi Puanı	I. Kesit (30+495.85 - 30+503.30 km)	II. Kesit (30+634.00 - 30+641.20 km)
Jeomekanik Sınıflama (Temel RMR)	32.4 - 47.1 (40)	34.4 - 50.1 (42)
Tünelcilik Niteliği İndeksi (Q)	0.17 - 1.63 (0.90)	0.13 - 1.08 (0.61)



Şekil 1. Tünel geçkisi üzerinde incelenen kesitler.

melerinde çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen görgül (ampirik) yaklaşımlar kullanılmaktadır. Önerilen görgül eşitlikler, kaya malzemesi dayanım ve deformasyon özellikleri ile kaya kütlesi sınıflama sistemlerinden elde edilen sınıflama puanlamalarına dayalıdır. Bu çalışmada da birçok araştırmacı tarafından önerilen ilişkiler kullanılmıştır. Kaya kütlesi dayanımı ve deformasyon modülü değerleri için en büyük ve küçük değerler hariç tutularak ortalama değer hesaplanmıştır (Çizelge 2 ve 3).

4. Birincil Gerilme Alanının Tahmini

Sayısal çözümlerinde kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon özellikleri yanında kazı yapılan ortamdaki birincil

Çizelge 2. Farklı görgül yaklaşımlara göre belirlenen kaya kütlesi dayanım değerleri.

Araştırmacılar	Kesit I	Kesit II
Yudhbir vd. (1983)	0.83	1.01
Aydan ve Dalgıç (1998)	8.28	9.08
Ramamurthy (1986)	3.22	3.68
Kalamaris ve Bieniawski (1995)	6.79	7.53
Sheorey (1997)	4.11	4.66
Barton (1995)	1.81	1.55
Hoek ve Brown (1980)	2.94	3.38
Goel (1994)	22.1	18.6
Bhasin ve Grimstad (1996)	15.1	12.95
Trueman (1998)	5.43	6.31
Barton (2000)	12.2	10.4
σ_{cm} (MPa)* (Ortalama)	6.66	6.62

*En büyük ve en küçük değerler hariç tutulmuştur.

Çizelge 3. Farklı görgül yaklaşımlara göre belirlenen kaya kütlesi deformasyon modülü değerleri.

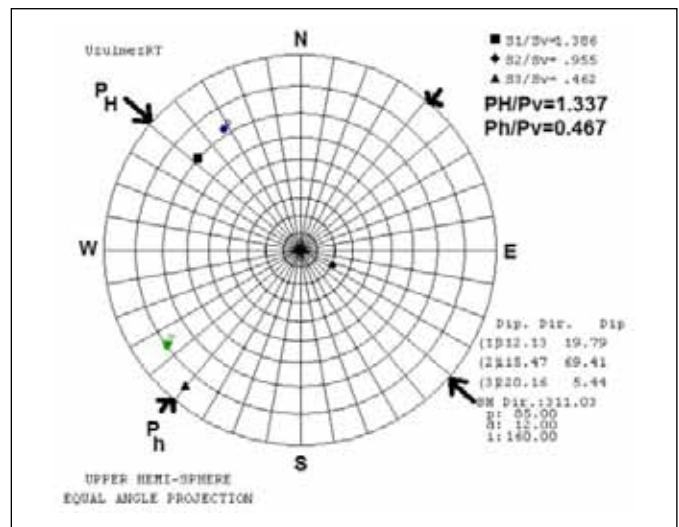
Araştırmacılar	Kesit I	Kesit II
Nicholson ve Bieniawski (1990)	1.91	2.15
Aydan ve Kawamoto (2000)	1.98	2.17
Hoek ve Diederichs (2006)	0.72	0.79
Mitri vd. (1994)	6.84	7.59
Sönmez vd. (2006)	4.91	5.68
Barton (1995)	9.65	8.48
Read vd. (1999)	6.28	7.54
Serafim ve Pereira (1983)	5.54	6.40
Aydan vd. (1997)	4.45	5.52
Hoek ve Brown (1997)	3.80	4.39
Barton (2002)	9.09	7.99
E_m (GPa)* (Ortalama)	4.98	5.49

*En büyük ve en küçük değerler hariç tutulmuştur.

gerilme alanı bileşenlerinin bilinmesi de çok önemlidir. Birincil gerilme alanının doğru tanımlanmadığı durumlarda sayısal çözümlerden elde edilecek bulgular tartışmalı hale gelmektedir. Birincil gerilmelerin en sağlıklı elde edilebilmesi doğrudan arazi ölçümleri ile sağlanabilmektedir. Arazi ölçüm yöntemlerinin pahalı olması ve zaman alması nedeniyle çok büyük projeler dışında uygulama bulamamaktadır. Çalışma yapılan sahada herhangi bir ölçüm bulunmaması nedeniyle Aydan (2000) tarafından önerilen fay çizdiği ölçümlerinin matematiksel çözümlemesi ile bulunan bir yöntem kullanılmıştır. Üzülmez tüneli doğrultusu KB-GD doğrultusunda olup yataydaki en büyük birincil gerilme doğrultusu yaklaşık olarak tünel güzergahı doğrultusunda etkidiği tahmin edilmiştir. En büyük yatay birincil gerilme oranı $k_z = P_H/P_v = 1.34$ ve en küçük yatay birincil gerilme oranı ise $k = P_h/P_v = 0.47$ olarak hesaplanmıştır (Şekil 2).

5. Sayısal Gerilme Çözümlemeleri

Üzülmez tünellerinin çözümlenmesinde iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sayısal gerilme çözümlerleri için PHASE2 (v8.0) (Rocscience 2007) bilgisayar programı kullanılmıştır. Program ile karmaşık ve çok aşamalı kazı ve tahkimat modelleri istenilen sayıda aşama ile oluşturulabilmekte ve kullanıcı dostu olması nedeniyle de oldukça hızlı modelleme ve sonuç alınabilmektedir. Püskürme beton, beton, çeşitli tür kaya sapsaması, çelik tahkimat ve bunların kombinasyonları gibi tahkimat seçenekleri sağlamaktadır. Bu nedenle program tasarımcıya projeye uygun tahkimat elemanları seçiminde ve tahkimatın duraylık için yeterliği konusunda hızlı bir öneri sağlayabilmektedir. PHASE2 programında kaya kütlelerinin hem elastik hem de



Şekil 2. Birincil gerilme tahmini.

çeşitli yenilme ölçütleri kullanılarak elasto-plastik malzeme davranışları modellenenmektedir. Elasto-plastik malzeme davranışları için Mohr-Coulomb, Hoek-Brown ve Drucker-Prager yenilme ölçütleri kullanılabilir. Bu çalışmada, kaya kütlelerinin elastik kusursuz plastik malzeme davrandığı kabul edilmiş ve Mohr-Coulomb yenilme ölçütü kullanılmıştır.

5.1. Açıklık Geometrisi ve Sınır Koşulları

Tünel genişliği 11 m ve yüksekliği ise 8 m olan taban kemersiz, at nalı kesite sahiptir. İki tüp arasındaki uzaklık 17.5 m'dir. Tüneli çevreleyen kaya kütlesi için oluşturulan sonlu elemanlar ağı üçgen elemandan oluşturulmuştur. Model sınırının açıklıktan uzaklığının seçiminde, açıklık kazısı ile oluşan ikincil gerilme alanının sınır koşullarını etkilememesine dikkat edilmiştir. Ayrıca, modelin yan sınırındaki tüm noktalar yalnızca düşey doğrultularda, tabanı ise hem yatay hem de düşey doğrultularda yer değiştirmeye izin vermeyecek şekilde sabitlenmiştir.

5.2. Modelleme Aşamaları

Tünellerin kazı ve tahkimat uygulamalarının modellenmesi için aşamalı kazı uygulanmıştır. Model, tünel için çift tüpte kazı ve tahkimatın modellendiği toplam 9 adet aşama ile oluşturulmuştur. Modelin 1. aşamasında yerçekimi etkisi altında birincil gerilmelerin oluşması sağlanmıştır. 2. aşamada sol tüp (Sapça yönünden Zonguldak yönüne doğru sol tarafta kalan) tünelin üst yarı kazısı yapılmıştır. 3. aşamada ise sol tüp tünelin üst yarısının tahkimatı (kaya saptamaları ve püskürtme beton) yapılmıştır. 4. aşamada sağ tüp tünelin üst yarı kazısını takiben 5. aşamada da sağ tüp tünelin üst yarı tahkimatı yapılmıştır. 6. aşamada ise tünelin sol tüp alt yarı kazısı ve takiben 7. aşamada ise sol tüp alt yarı tahkimatı yapılmıştır. Bunları takiben 8. ve 9. aşamalarda sağ tüp alt yarının kazısı ve tahkimatı uygulanmıştır.

5.3. Yük Dağılımı ve Tahkimatın Modellenmesi

NATM (Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi) yönteminin temel esaslarından olan birden fazla kazı aşaması ile yapılan tünellere uygulanacak tahkimatın sayısal modellenmesinde yük dağılımının uygulanması gerekmektedir. Aşamalı kazılarda arazi tahkimat etkileşimi göz önünde bulundurulduğunda kazı ile tahkimatın yük almaya başlaması arasında arazi bir miktar yerdeğiştirmeye uğramaktadır. Sayısal çözümlemede kullanılan aşamalı tahkimat modellemesi yapılan çözümlerde "yük dağılımı" işlevi kullanılarak yukarıda açıklanan durum modellenmiştir. Bu işlev ile tahkimat kurulana kadar geçen sürede birincil gerilmelerin kaya kütle-

sinde oluşturacağı yerdeğiştirmenin ne kadarlık bölümünün etkin olduğu oransal olarak girilmektedir. Geniş ve Acun (2015) çalışmalarında sayısal çözümlerinde kullanılan yük dağılımını tahkimat kurulana kadar olan birinci aşama için %70-75 ve tahkimat kurulduktan sonraki aşama için de %25-30 arasında kullanılabilceğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada tahkimat kurulana kadar olan birinci aşama için %70 ve tahkimat kurulduktan sonraki aşama için de %30 arasında yük dağılımı uygulanmıştır. Her bir kazı+tahkimat uygulamasından sonraki kazı aşaması başlamadan önce ortamdaki birincil gerilmeler sayısal olarak yeniden oluşturulmuştur. Her bir kazı ve tahkimat uygulaması aşamalarında aynı kazı oranları uygulanmıştır.

Tünelin incelenen kesitlerinde, SN kaya saptaması (uzunluk 4 m, 28 mm çapında) ve IBO kendi delen kaya saptamaları (uzunluk 6 m, 32 mm çapında) sistematik olarak uygulanmıştır. Kaya saptaması ve delici uçtan oluşan IBO saptaması içinden çimento enjeksiyonu yapılarak uygulanmıştır. Bu saptamanın delici ucu çimento enjeksiyonu sonucu delik içinde kalmaktadır. C20/25 püskürtme betonu 25 cm kalınlığında uygulanmıştır. Q 221/221 çelik hasır 2 sıra uygulanmıştır. Ayrıca NPI 140 profile sahip çelik iksa (çelik bağ) kullanılmıştır.

6. Duraylılık Değerlendirmesi

Duraylılık değerlendirmeleri Şekil 1'de verilen iki adet kesit için yapılmıştır. Değerlendirme kazı öncesi aşama, üst yarı kazısının tahkimat yapıldıktan sonraki aşaması ve en son kazı aşamaları için yapılmıştır.

6.1. Kesit-I için Yapılan Sayısal Analiz Sonuçları

Tünelin 30+495.85 - 30+503.30 km arasında kalan bölge için sayısal gerilme çözümlenmesi yapılmıştır. Örtü yüksekliğinin yaklaşık 72 m olduğu bu bölgede açıklığın bulunduğu seviyede en büyük asal gerilmenin yaklaşık 2 MPa civarında ve en küçük asal gerilme ise 0.90 MPa olarak hesaplanmıştır. Sol tüp üst yarı kazısı sonucunda en büyük asal gerilmeler açıklık tavanında 0.60 MPa ve açıklık köşe tabanında en yüksek değerini alarak 3 MPa olduğu bulunmuştur. En büyük ve en küçük asal gerilmenin tünelin yan duvarlarında yüksek olmasının nedeni düşey birincil gerilmenin yatay birincil gerilmeden yüksek olmasıdır. Gerilme akıları tünelin yan duvarlarında diğer bölgelere göre daha yüksek gerilmelere neden olmaktadır. En küçük asal gerilme açıklık tabanlarında tüm kazı aşamaları için çekme gerilmelerine dönüşmektedir. Sağ tüp üst yarı kazısı sonucu sol tüpte oluşan gerilme koşullarının benzeri sağ tüp için de elde edilmiştir. En son kazı aşaması olan sağ tüp alt

yarı kazısı sonucu açıklık köşe taban bölgelerinde (eğrilik yarıçapının en küçük olduğu bölge) en büyük birincil gerilme değeri 3.6 MPa, açıklık tabanında 0 ve açıklık tavanında ise 0.90 MPa olmuştur (Şekil 3). En küçük asal gerilme açıklık tabanında -0.2 MPa çekme gerilmesi oluşmuştur. Sağ tüp alt yarı kazısı sonucu açıklık çevresinde oluşan gerilme dağılımları sol tüpte oluşan gerilme koşullarının benzeri olmuştur.

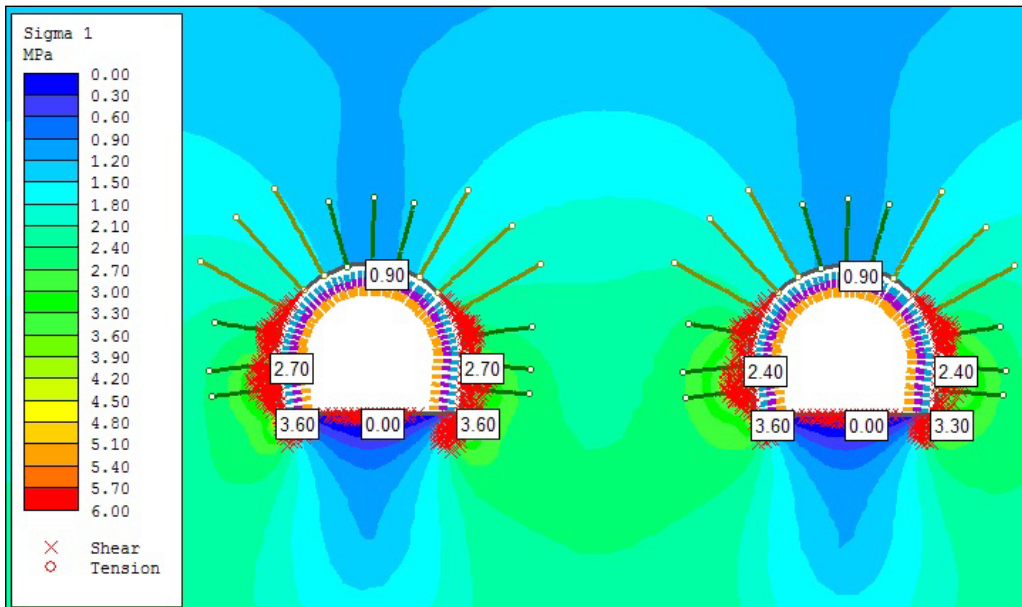
Toplam yerdeğiştirme miktarları tüm kazı ve tahkimat aşamaları tamamlandıktan sonra sol tüp tünel tavanında 1.14 cm, tünel tabanında 0.96 cm ve sağ tüp tünel tavanında 0.96 cm, tünel tabanında 0.66 cm olarak hesaplanmıştır. Açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgelerinin incelenen tüm kazı ve tahkimat aşamalarında genellikle açıklığın yan duvarlarında ve tabanında oluştuğu belirlenmiştir. Oluşan yenilme bölgelerinin büyüklüğünün özellikle kaya saplamalarının uzunluğundan daha kısa bölgelerde sınırlı kaldığı görülmüştür (Şekil 3).

Tahkimat elemanı olarak uygulanan kaya saplaması ve püskürtme betonda herhangi bir yenilme gözlenmemiştir. Tünelin sağ ve sol omuz bölgelerinde 6 m uzunluğunda IBO tipi (32 mm çaplı) kendinden matkaplı saplamalar ile 4 m uzunluğunda tavanda 3 adet ve yan duvarlarda 6 adet olmak üzere toplam 9 adet SN (28 mm çaplı) tip kaya saplaması kullanılmıştır. SN tipi saplamanın aksel çekme dayanımı 243.6 MPa ve aksel kalıcı çekme dayanımı 16.2 MPa'dır. IBO tipi saplamanın aksel çekme dayanımı 186.5 MPa ve aksel kalıcı çekme dayanımı 12.4 MPa'dır. Sol tüp üst yarı kazısı sonucu tünel yan

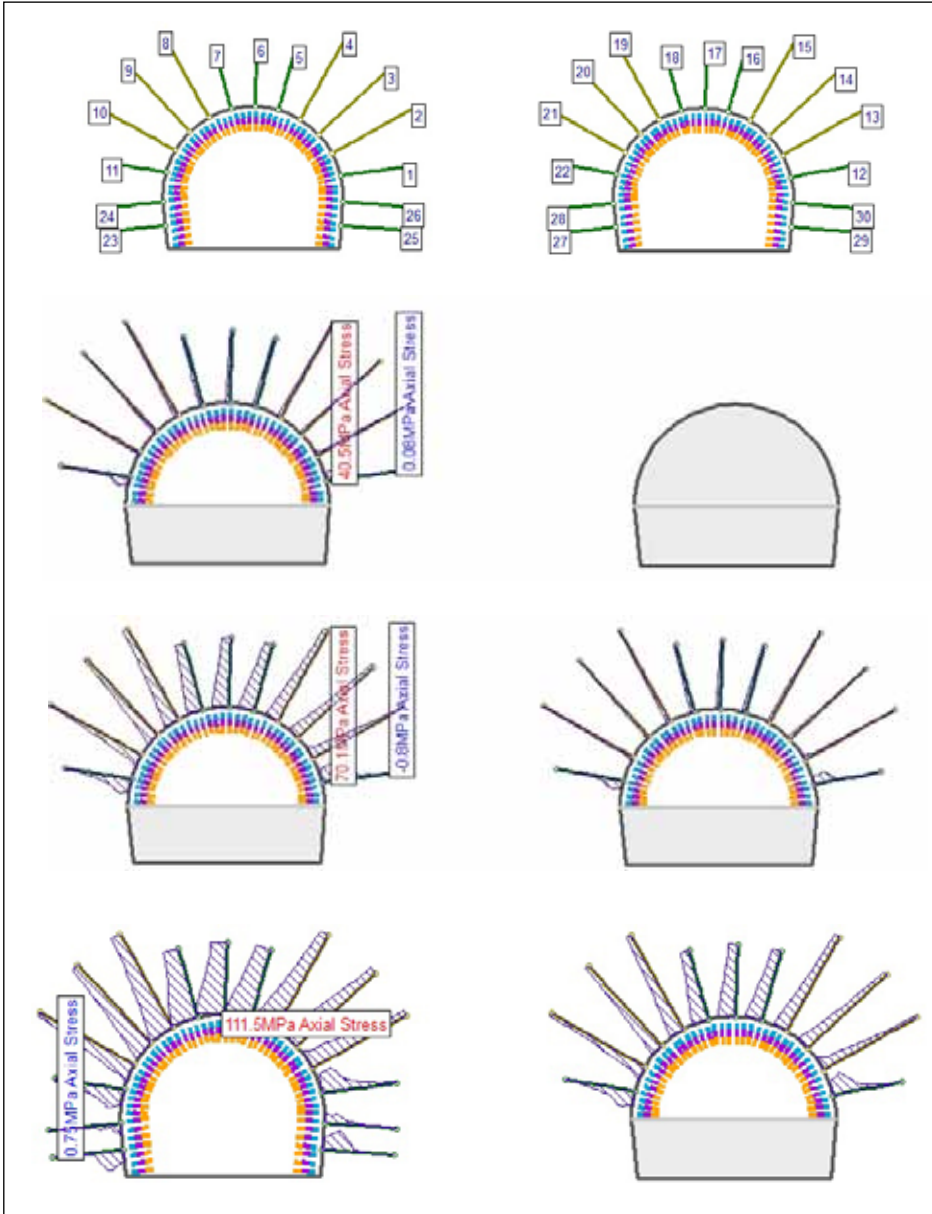
duvarında bulunan 25 no.lu saplamada (Şekil 4.a) en büyük aksel çekme gerilmesi 40.5 MPa ve sağ tüp üst yarı kazısı sonucunda da yine aynı saplamada en büyük çekme gerilmesi 70.1 MPa olarak bulunmuştur (Şekil 4.b ve 4.c). Sol tüp alt yarı kazısı yapıldıktan sonra sol tüp 6 no.lu SN saplamada 111.5 MPa lık bir çekme gerilmesi oluşmuştur. Sağ tünel alt yarı kazısı tamamlandıktan sonra en büyük aksel çekme gerilmesi sol tüp tünelde 23 no.lu saplamada 174.4 MPa olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.d ve 4.e). En büyük çekme gerilmelerinin beklendiği gibi saplamanın açıklığa yakın kısımlarında oluştuğu görülmektedir. Her iki tüpte kullanılan saplamalarda oluşan aksel çekme gerilmelerinin saplamaların akma dayanımlarının altında kaldığı yani üzerine etkiyen yükleri güvenle taşıdıkları elde edilmiştir.

6.2. Kesit-II için Yapılan Sayısal Analiz Sonuçları

Tünelin 30+634.00 - 30+641.20 km arasında kalan bölge için sayısal gerilme çözümlemesi yapılmıştır. Örtü yüksekliğinin yaklaşık 160 m olduğu bu bölgede açıklığın bulunduğu seviyede en büyük asal gerilmenin yaklaşık 4.2 MPa ve en küçük asal gerilme ise 1.95 MPa olarak hesaplanmıştır. Toplam yerdeğiştirme miktarları tüm kazı ve tahkimat aşamaları tamamlandıktan sonra sol tüp tünel tavanında 3.4 cm, tünel yan duvarında 2.4 cm ve sağ tüp tünel tavanında 2.8 cm, tünel yan duvarında 2 cm olarak hesaplanmıştır. Açıklık çevresinde oluşan yenilme bölgeleri incelenen üst yarı ve alt yarı kazısı ve tahkimat aşamalarında açıklığı tümüyle çevrelediği belirlenmiştir. Oluşan yenilme bölgelerinin büyüklüğünün tünelleri çevreleyen bazı



Şekil 3. En büyük asal ikincil gerilme ve yenilme bölgesi dağılımı.



Şekil 4. Tünelin I. kesitinde saplamalarda oluşan aksel çekme gerilmesi dağılımları.
A) Saplama numaraları,
B) Sol tüp üst yarı tahkimatı sonrası,
C) Sağ tüp üst yarı tahkimatı sonrası,
D) Sol tüp alt yarı tahkimatı sonrası,
E) Sağ tüp alt yarı tahkimatı sonrası.

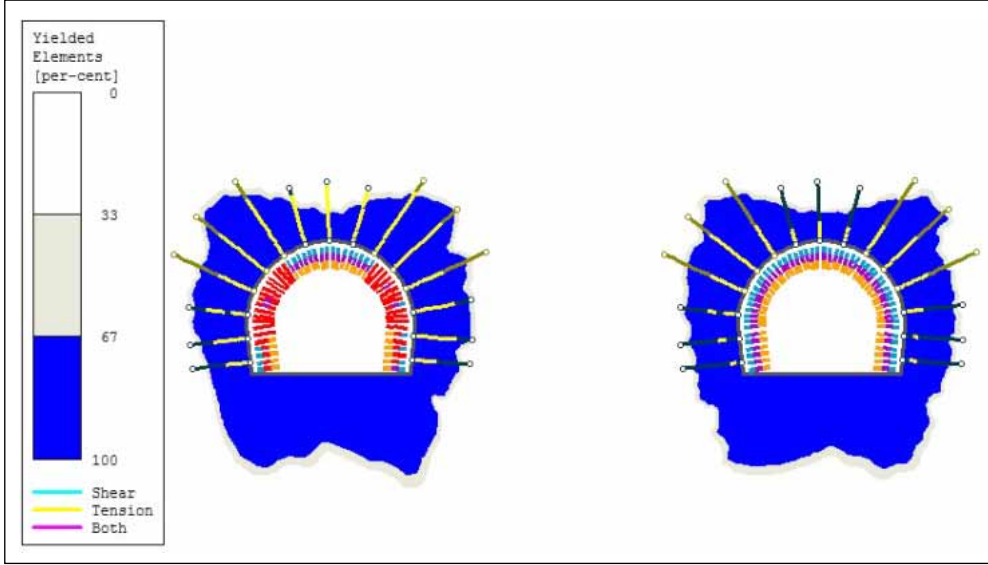
bölgelerde kaya saplamalarının uzunluğu kadar oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 5).

Üzülmez tünelinin en derin bölgesinde uygulanan tahkimat elemanlarının bazı bölümleri plastik davranış göstermiştir. Şekil 5'de sağ ve sol tüpte uygulanan kaya saplamalarında kısmi uzunluklarında çekme modunda yenilmenin oluştuğu anlaşılmaktadır. Sol tüp açıklık tavanında bulunan 6 no.lu SN saplama boyunca oluşan aksel gerilmenin saplama boyunca değişimi de Şekil 6'da verilmiştir. Sol tüp alt yarı kazısından sonraki (Aşama 5 ve sonrası) adımlarda 6 no.lu SN saplama boyunca oluşan aksel çekme gerilmesi saplamanın en büyük çekme dayanımı aşarak saplamanın uzunluğu boyunca yenilme oluşmuştur. Her iki tüpte kullanılan saplamalarda

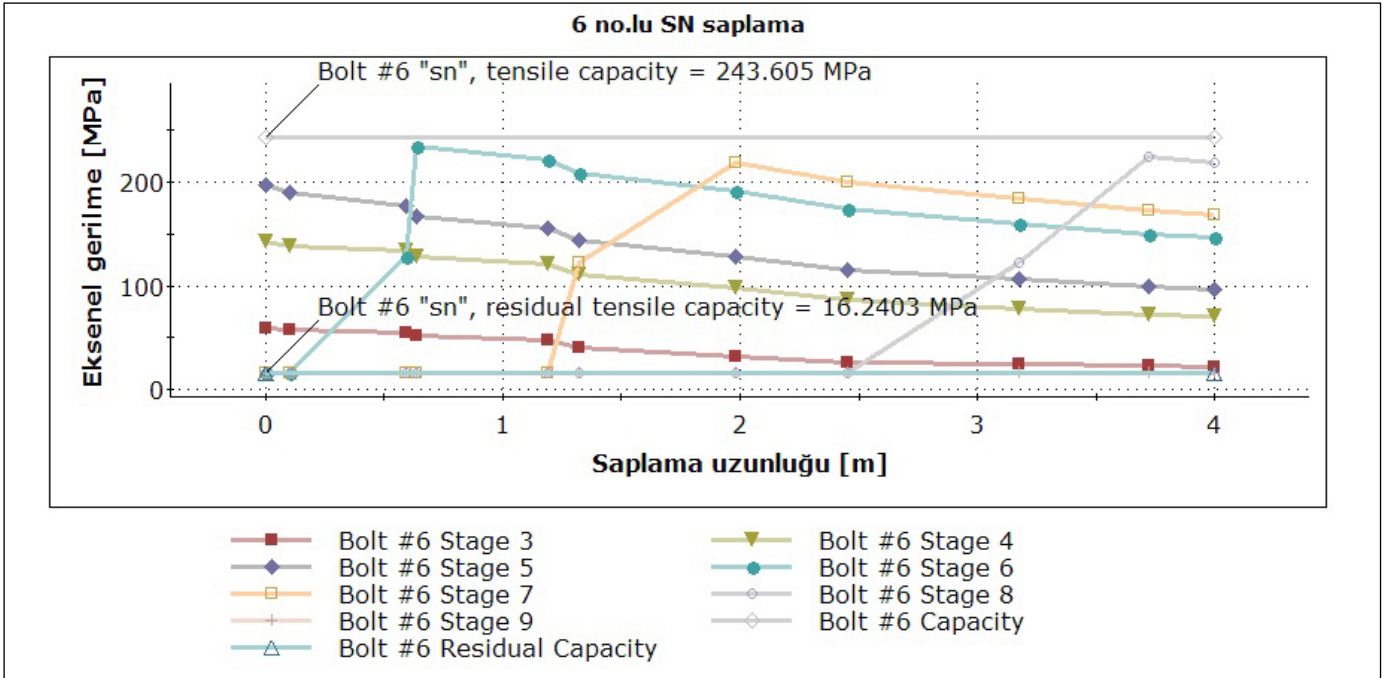
oluşan aksel çekme gerilmelerinin saplamaların akma dayanımlarını saplamaların kısmi uzunluklarında aştığı belirlenmiştir.

7. Sonuçlar

Bu çalışmada, uygulanan kazı ve tahkimat aşamaları ile tanımlanan duraylılık değerlendirmeleri sayısal gerilme çözümlenmeleri ile yapılmıştır. Tünelde biri derinliğin en yüksek olduğu iki ayrı kesit seçilmiş ve bu bölgelerde uygulanan tahkimatın yeterlilikleri kontrol edilmiştir. I. kesitte açıklık çevresinde yenilme bölgeleri oluşmuştur. Bununla birlikte incelenen tüm modelleme aşamalarında tahkimat elemanlarında plastik davranış gözlenmemiştir. Tünelin en



Şekil 5. Tünelin son kazı aşamasından sonra oluşan yenilme bölgeleri.



Şekil 6. Sol tüp tavanında bulunan 6 no.lu SN saplamada oluşan eksenel çekme gerilmesinin saplama uzunluğunca değişimi.

derin bölgesi olan II. kesitte ise kaya kütlelerinde oluşan yenilme bölgesi, uygulanan kaya saplamalarının uzunluğundan daha küçük bölgede sınırlı kalmıştır. Sol tüpte uygulanan tahkimat elemanlarında kısmi yenilmeler oluşmuştur. Çözümlemelerde nihai beton kaplaması göz önünde bulundurulmamıştır. İncelenen kesitlerde kaya kütleleri dayanım ve deformasyon özelliklerinin en küçük değerleri kullanılarak güvenli bölgede kalacak şekilde analizler yapılmıştır. Sayısal çözümlemelerde kullanılan yük dağılımı oranları sayısal çözümlerden elde edilecek sonuçların arazi gözlemleri

ile uyumunu önemli derecede etkilemektedir. Bu nedenle kaya tahkimat etkileşiminin iyi anlaşılabilmesi açısından sayısal çözümlemelerde kullanılan yük dağılımı oranlarının göz önünde bulundurularak uygun oranların kullanılması sonuçların güvenilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca sayısal çözümlemelerle elde edilen bulguların arazi gözlemleri ile karşılaştırılması önemlidir. Sayısal çözümlemelerde kullanılan girdi parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan bazı görgül eşitliklerin ve yaklaşımların seçiminin güvenilirliği geri analizler yapılarak değerlendirilmelidir.

8. Teşekkür

Bu çalışma Bülent Ecevit Üniversitesi tarafından desteklenmiştir (Proje No:2013-981-50330-03). Ayrıca yazarlar, Karayolları Genel Müdürlüğü, 15. Bölge Müdürlüğü'ne, arazi çalışmaları sırasında yardımlarından dolayı KGM Kontrol Şefi İnşaat Yük. Müh. Suat Cüre'ye, ENEZ İnşaat Proje Müdürü Jeoloji Müh. Selçuk Genç'e, tüm proje çalışanlarına ve bununla birlikte yayının değerlendirilmesi sürecinde eleştiri ve katkı koyan hakemlere teşekkür ederler.

9. Kaynaklar

- Anon 2011** Üzülmez 1,2 tüneli kesin proje. Mega Mühendislik, Ankara, 145 s.
- Aydan, Ö. 2000.** Fay çiziklerinden yer kabuğuna etkileyen gerilmelerin saptanması için yeni bir yöntem ve uygulaması. *Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni*, 22: 223-236.
- Aydan, Ö., Dalgıç, S. 1998.** Prediction of deformation behaviour of 3 lanes Bolu tunnels through squeezing rocks of North Anotolian Fault Zone (NAFZ). *Proc. of the Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering*, Taipei, pp. 228-233.
- Aydan, Ö., Kawamoto, T. 2000.** Assessing mechanical properties of rock masses by RMR rock classification method. *GeoEng. 2000 Symposium*, Sydney, OA0926.
- Aydan, Ö., Ulusay, R., Kawamoto, T. 1997.** Assessment of rock mass strength for underground excavations. *The 36th US Rock Mechanics Symposium*, pp. 777-786.
- Barton, N. 1995.** The influence of joint properties in modelling jointed rock masses. *8th Int. Rock Mech. Congress*, Tokyo, pp. 1023-1032.
- Barton, N. 2000.** TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock. Balkema, Rotterdam, 173 pp.
- Barton, N. 2002.** Some new Q value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 39:185-216.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, I. 1974.** Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6(4):189-239.
- Bhasin, R., Grimstad, E. 1996.** The use of stress-strength relationships in the assessment of tunnel stability. *Tunn. Undergr. Space Tech.*, 11(1):93-98.
- Bieniawski, ZT. 1989.** Engineering Rock Mass Classifications, Wiley, New York.
- Geniş, M., Acun, D. 2015.** Kuyu duraylılığının analitik ve sayısal yöntemler ile karşılaştırmalı bir incelemesi. *Çukurova Ün. Müh. Mimar. Fak. Derg.*, 30(2):201-215.
- Goel, RK. 1994.** Correlations for predicting support pressures and closures in tunnels. *PhD Thesis*, Nagpur University, Nagpur, India, 308 pp.
- Grimstad, E., Barton, N. 1993.** Updating the Q-system for NMT. *Proc. of the International Symposium on Sprayed Concrete-Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support*, Oslo, Norwegian Concrete Association.
- Hoek, E., Brown, ET. 1980.** Underground excavation in rock. *Institution of Mining and Metallurgy*, London, 527 pp.
- Hoek, E., Brown, ET. 1997.** Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 34(8):1165-1186.
- Hoek, E., Diederichs, MS. 2006.** Empirical estimation of rock mass modulus. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 43:203-215.
- ISRM. 2007** *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*. R. Ulusay and J. A. Hudson (eds.), Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Kozan Ofset, Ankara, Turkey, 628 p.
- Kalamaris, GS., Bieniawski, ZT. 1995.** A rock mass strength concept for coal incorporating the effect of time. *Proc. of the Eighth International Congress of the Rock Mechanics*, Rotterdam: Balkema, pp. 295-302.
- Mitri, HS., Edrissi, R., Henning, J. 1994.** Finite element modelling of cable-bolted stopes in hardrock ground mines. *SME Annual Meeting*, New Mexico, pp. 94-116.
- Nicholson, GA., Bieniawski, ZT. 1990.** A nonlinear deformation modulus based on rock mass classification. *Int. J. Min. Geol. Eng.*, 8:181-202.
- Ramamurthy, T. 1986.** Stability of rock mass. *Indian Geotech J*, pp. 1 - 74.
- Read, SAL., Richards, LR., Perrin, ND. 1999.** Applicability of the Hoek-Brown failure criterion to New Zealand greywacke rocks. *Proc. 9th Int. Cong. on Rock Mech.* Paris, 2, pp.655-660.
- Rocscience. 2007.** Phase2 (ver. 8), Toronto, Canada, <http://www.rocscience.com/>
- Serafim, JL., Pereira, JP. 1983.** Consideration of the geomechanics classification of Bieniawski. *Proc. Int. Sym. on Eng. Geol. Undergr. Const.*, Lisbon, Portugal, pp. 1133-1144.
- Sheorey, PR. 1997.** Empirical rock failure criteria. Rotterdam, Balkema.
- Sönmez, H., Gökçeoğlu, C., Nefeslioğlu, HA., Kayabaşı, A. 2006.** Estimation of rock modulus: for intact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 43:224-235.
- Trueman, R. 1998.** An evaluation of strata support techniques in dual life gate roads. *PhD Thesis*, University of Wales, Cardiff.
- Yudhbir, Y., Lemanza, W., Prinzi, F. 1983.** An empirical failure criterion for rock masses. *Proc. of the Fifth International Congress Society of Rock Mechanics*, Melbourne, Vol. 1, pp. B1-8.