



Kaya Sınıflarına Göre Destek Sistemleri Belirlenmesi-Tlemcen-Akkid Abbas (Cezayir) Yüksek Hızlı Demiryolu Projesi

Ebu Bekir AYGAR^{ID}

Fugro Sial Yerbilimleri Müşavirlik ve Mühendislik Ltd. Şti. Ankara, Türkiye

eaygar@gmail.com

(Alınış/Received: 24.08.2022, Kabul/Accepted: 17.09.2022, Yayımlama/Published: 31.01.2023)

Öz: Tüneller için yapılan kaya kütle sınıflamalarında karşılaşılan en büyük sorunlardan birisi, tünel kesitinde farklı birimler geçilmesi durumunda hangi desteklerin uygulanacağıdır. Tünel kesitinde üst yarıda zayıf birim ile karşılaşılırken alt yarı ve invert kesimi ise sağlam birimde yer alabilmektedir. Bu durumlarda ise kaya kütlesi en kötü koşullara göre belirlenirken, destek sisteminde ise farklılıklar olabilmektedir. Üst yarıda ağır destek sistemi gerekirken invert kesiminin sağlam birimde kalması durumunda invert kazısı yapılmaz. Ayrıca zayıf zeminlerde açılan tünellerde karşılaşılan sorunlar genelde sıkışma mekanizmasına bağlı olarak tünel destek sistemlerinde yenilmeler ile tünel aynasında karşılaşılan stabilite sorunları olarak karşımıza çıkmaktadır. Zayıf zeminlerde genelde destek sistemlerinin tamamlanmasından sonra uzun dönemde yenilmeler meydana gelmektedir. Sığ tünellerde ise, tünel çevresinde kemerlenme sağlanamaması sebebi ile destek sistemlerinin tasarımı daha kritiktir. Zira deformasyonlara müsaade edilmesi tünel çevresinde yüzeye kadar etkileyecek deformasyonları tetikleyebilecektir. Ayrıca tünel aynasında kazı esnasında oluşabilecek bir yenilmenin etkisi yüzeye kadar obruk şeklinde yansıması olacak ve tüm tünel destek sistemlerini etkileyecektir. Bu sebeple sığ örtü altında zayıf zeminlerde açılan tünellerde deformasyonlara müsaade edilmeden destek sistemleri tamamlanmalıdır. Ayrıca tünel aynasında herhangi bir göçüğün oluşmaması için ayna destek sistemlerinin yapılması zorunludur. Bu çalışma kapsamında Tlemcen Akkid Abbas Yüksek Hızlı Demiryolu Projesinde açılan T10 tüneli destek sistemleri ve tünel tasarımı incelenmektedir. Yapılan çalışma sonucunda zayıf zeminlerde tünel destek sistemlerinin belirlenmesinde ayna ve tavan stabilitesinin son derece önemli olduğu görülmüştür. Ayrıca uzun dönemde sıkışma sorunlarının önüne geçmek için tünel destek sistemi basıncı belirlenirken, kritik destek sistemi basıncından en az 2-3 kat yüksek olması gerektiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Sıkışma, Zayıf zemin, Sığ örtü, Tünel

Determination of Support Systems According to Rock Classes-Tlemcen-Akkid Abbas High Speed Railway Project-Algeria

Abstract: One of the biggest problems encountered in rock mass classifications for tunnels is which supports will be applied in case of passing with different units in the tunnel section. While a weak unit is encountered in the top heading of the tunnel section, bench and invert section can be found in the rock. In these cases, while the rock mass is determined according to the worst conditions, there may be differences in the support system. While heavy support system is required in the top heading invert excavation may not be performed if the invert section remains in the high quality rock mass. In addition, the problems encountered in tunnels excavated in weak units are generally encountered as failures in the tunnel support systems due to the squeezing mechanism and stability problems encountered in the tunnel face. In weak units, long-term failures usually occur after the completion of the support systems. In shallow tunnels, the design of the support systems is more critical since arching cannot be achieved around the tunnel. Because allowing deformations may trigger deformations around the tunnel that affects up to the surface. In addition, the effect of a failure that may occur during excavation in the tunnel face may be reflected up to the surface and may affect all tunnel support systems. For this reason, support systems should be completed without allowing deformations in tunnels excavated on weak soils under shallow overburden. In addition, it is obligatory to make face support systems in order to prevent any collapse in the tunnel face. Within the scope of this study, T10 tunnel support systems and tunnel design excavated in Tlemcen Akkid Abbas High Speed Railway Project is examined. As a result of the study, the stability of the tunnel face and ceiling is

Atıf için/Cite as: E.B. Aygar, "Kaya sınıflarına göre destek sistemleri belirlenmesi-Tlemcen-Akkid Abbas (Cezayir) yüksek hızlı demiryolu projesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 17, pp. 14-25, Jan. 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1166236

extremely important in the determination of tunnel support systems in weak units. In addition, the tunnel support system pressure should be at least 2-3 times higher than the critical support system pressure in order to prevent squeezing problems in the long term.

Keywords: Squeezing, Weak unit, Shallow overburden, Tunnel

1. Giriş

Dünyada hızlı bir şekilde gelişen demiryolu taşımacılığına bağlı olarak yüksek hızlı demiryollarının da yapımında büyük artış gözlenmektedir. Cezayir Tlemcen-Akid Abbas demiryolu projesi de bu amaçla oluşturulmakta ve ülkenin kuzeyinde doğudan batıya doğru ulaşımı sağlamak amacıyla gerçekleştirilmektedir. Bu hat kapsamında açılan tünellerde yapılan projelendirme çalışmalarında kaya kütle puanlama sistemi (RMR) [1], [2], [3], Q sistemi [4], [5], [6] ve Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi [7], [8], [9], [10], [11] prensipleri kullanılmaktadır.

Yüksek hızlı demiryolu projesi kapsamında projelendirilen T10 tüneli hem zayıf zemin olması hem de sığ örtü altında açılması sebebi ile önem arz etmektedir. Zayıf zeminlerde açılan tünellerde yaşanan en büyük sorun uzun dönemde oluşacak olan deformasyonlardır [12-14]. Tünel ilk etapta stabil olsa dahi uzun dönemde sıkışmaya bağlı olarak destek sistemlerinde yenilmeler meydana gelmektedir [15-17]. Bu sebeple destek sistemleri belirlenirken rijit bir tahkimat sisteminin veya deformasyonlara müsaade eden esnek bir destek sisteminin seçilmesi son dönemlerde tartışılır olmuştur [18-20].

Sığ yeraltı tünellerinde ise tünel ayna ve tavan stabilitesinin önemi tartışılmaz bir gerçektir [21-22]. Çünkü tünel aynasında oluşacak olan bir deformasyonun ve kaymanın yüzeye kadar yansması ve ciddi göçükler ile sonuçlanması muhtemeldir. Yapılacak olan ayna ve tavan destekleri tünel aynasında deformasyonları en az düzeye indireyecek şekilde tasarlanmalıdır.

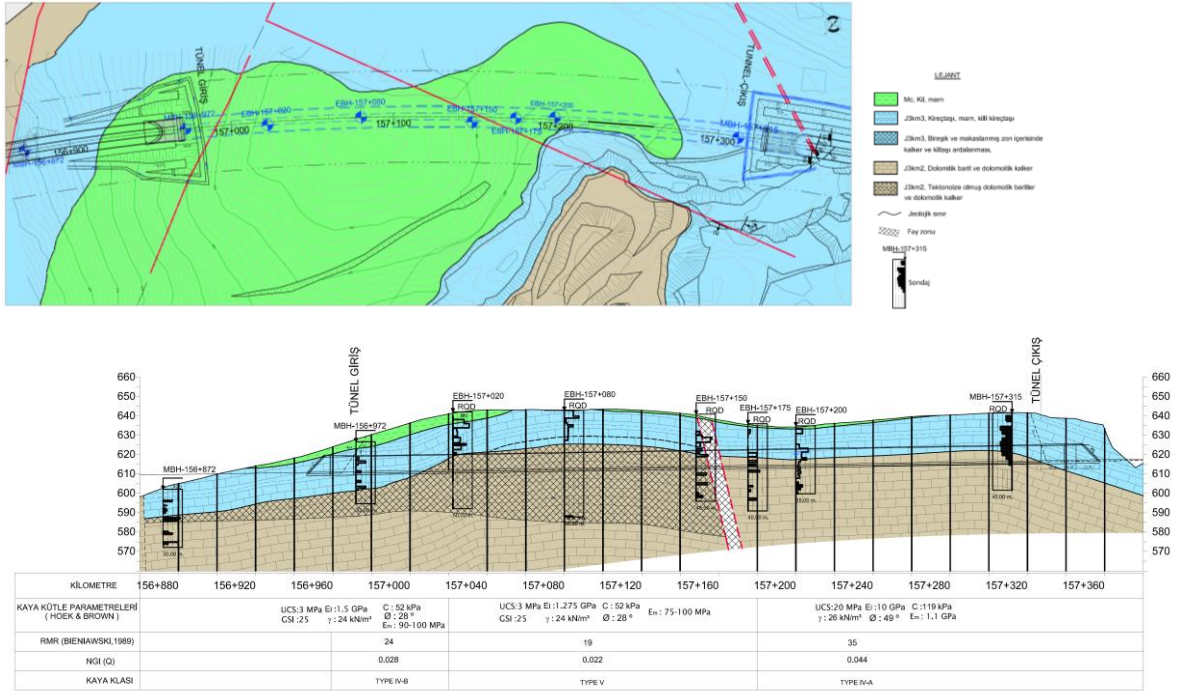
Tünelde genelde kaya sınıfı belirlenirken en kötü koşullar dikkate alınır. Ancak tünel kesitinin büyük olduğu durumlarda ise tünel üst yarı, alt yarı ve invert kesimlerinin farklı birimlerde olması muhtemeldir. Bu durumlarda ise Aygar [23] tarafından belirtildiği gibi, aynı kaya sınıfı içerisinde farklı destek sınıfları olması doğaldır. Örneğin RMR kaya sınıfına göre üst yarı kesimi çok zayıf kaya sınıfında yer alırken invert kesimi de sağlam kayada yer alabilir. Bu durumlarda kaya sınıfı çok zayıf olarak belirtilmesine rağmen invert kazısı yapılmayacaktır.

Araştırma konusu olan T10 tüneli de hem sığ örtü altında geçmesi, hem RMR kaya kütle sınıflama sistemine göre zayıf ve çok zayıf kaya sınıfı içerisinde yer alması sebebi ile değerlendirilmesi gereken bir tünel olarak karşımıza çıkmaktadır. Tünel kesitinde üst yarı zayıf kaya kütle içerisinde yer alırken taban kesimi ise sağlam birimde yer almaktadır. Bu kesitlerde tünel kaya sınıfı RMR sistemine göre Tip IV olarak belirtilmesine rağmen, destek sistemi ise Tip IV-A invertsiz ve Tip IV-B invertli olarak bölümlendirilmiştir.

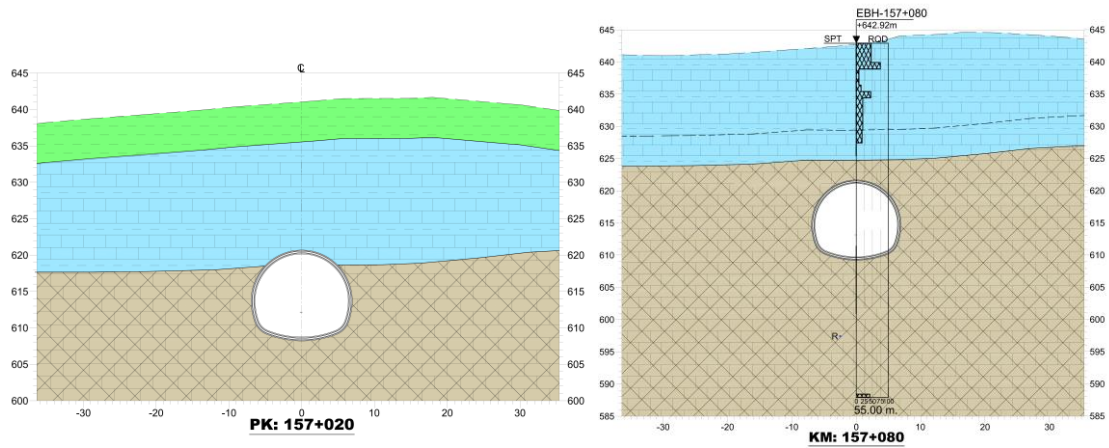
Bu çalışma kapsamında Cezayir Tlemcen-Akid Abbas Yüksek Hızlı Demiryolu projesi kapsamında açılacak olan T10 tüneline sıkışma mekanizması değerlendirilecek, analitik çözümler ile zemin ve destek sistemi reaksiyon eğrileri de dikkate alınmaktadır. Yapılan analizlerde desteksiz durumda tünel aynasında meydana gelen yerdeğiştirmelerin tünel aynasında 22 cm düzeyinde olduğu belirlenmiş ve toplam yerdeğiştirmelerin ise 1.4 m'ye kadar çıktığı görülmüştür. Sıkışma durumu değerlendirildiğinde ise tünelde aşırı sıkışmanın olacağı ve özel destek sistemi gerekli olduğu belirlenmiştir. Ayrıca tünel çevresindeki plastik zonun da tüm örtü yüksekliğini kapsayacak şekilde ilerlediği anlaşılmaktadır.

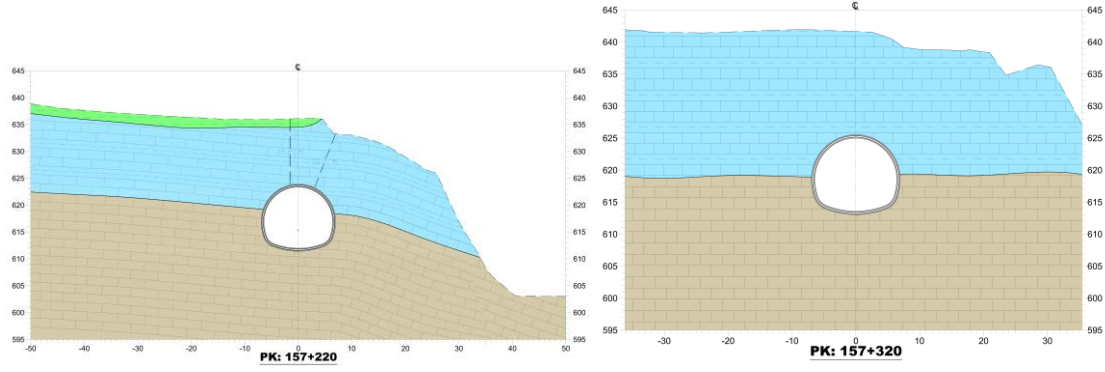
3. Tünel Güzergahının Jeolojik-Jeoteknik Durumu, Kritik Kesimler ve Kaya Sınıfları

Tünel 10 güzergahı boyunca derinlikleri 32 m ile 55 m arasında değişen toplam 10 adet araştırma sondajı yapılmıştır. Sondajlardan elden edilen numunelerden kaya ve zemin mekaniği deneyleri yapılmıştır. Sondajlardan elde edilen numuneler incelendiğinde kaya kalite indeksi (RQD) genelde 25'den küçük olarak tespit edilmiştir. Tünel Miyosen yaşlı kil/marn birimleri ile açık yeşil, açık yeşilimsi gri ve yeşilimsi kahverengi, Jura yaşlı karbonat (J3km3) birimleri içinden geçmektedir. Alt kesimlerde kumlu kireçtaşı birimleri (J3km2) vardır. Tünel B10 geçidinin güzergahının plan görünümü Şekil 3'de gösterilmiştir. Şekil 4'de ise km:157+020, 157+080 ve 157+220 den alınan jeolojik kesitler verilmiştir. Jeolojik kesitlerden de görüleceği gibi tünel iki ana birimden geçmektedir. Bu sebeple belirlenen destek sınıfları da farklı olmaktadır.



Şekil 3. T10 tüneli jeolojik plan ve profili





Şekil 4. Km:157+020, 157+080, 157+220 ve 257+320 için alınan jeolojik kesitler

Tünel güzergahında yapılan jeolojik ve jeoteknik değerlendirmeler sonucunda, tünel kaya sınıfları ile kaya kütle parametreleri belirlenmiştir. (Tablo 1). Yapılan araştırma sondajlarından elde edilen örneklerden tek eksenli basınç deneyi, doğal su içeriği testi, birim hacim ağırlık deneyi, üç eksenli basınç deneyi, drenajlı makaslama testi deneyleri ile kimyasal tesler yapılmıştır. Arazide yapılan jeolojik haritalamalar, yapılan süreksizlik ölçümleri, sondajlar ve deney sonuçlarının incelenmesi ile RMR [3] ve Q [6] kaya kütle sınıflama sistemleri kullanılarak kaya sınıfları belirlenmiştir.. RMR [3] kaya kütle sınıflamasına göre tünel zayıf kaya ve çok zayıf kaya koşullarında açılacaktır.

Tablo 1. T10 tüneli kaya sınıfları ve kaya kütle parametreleri

Kilometre	Kaya sınıfı	RMR (1989)	Q (NGI)	Birim hacim ağırlık (kN/m ³)	Kohezyon (kPa)	İçsel sürtüme açısı (°)	Deformasyon modülü (MPa)
Giriş Portalı-157+020	Zayıf Kaya	24	0.028	24	52	28	100
157+020-157+180	Çok zayıf kaya	19	0.022	24	52	28	75
157+180-157+290	Zayıf kaya	35	0.044	26	119	49	1100
157+290-Çıkış Portalı	Zayıf kaya	38	0.041	26	110	44	850

4. Tünel Sıkışma Mekanizmasının Değerlendirilmesi

Tünelde sıkışma mekanizmasının değerlendirmek amacıyla Jethwa vd. [24] ve Hoek ve Marinos [25] yaklaşımları kullanılacaktır. Bu yaklaşımlarda kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı ile arazi gerilmesi dikkate alınarak sınıflandırma yapılmıştır.

Jethwa sıkışma mekanizmasını N_c katsayısına göre tanımlamış ve N_c katsayısı için denklem 1'i önermiştir.

$$N_c = \frac{\sigma_{cm}}{P_o} = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma \cdot h} \quad (1)$$

Burada σ_{cm} kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı, P_o arazi gerilmesi, γ birim hacim ağırlık ve h ise örtü yüksekliğidir. Jethwa vd. [24] N_c değerine bağlı olarak sıkışmayı Tablo 2'de verdiği şekilde tanımlamıştır.

Tablo2. Jethwa vd.'ne göre N_c değerine göre sıkışma derecesi [24]

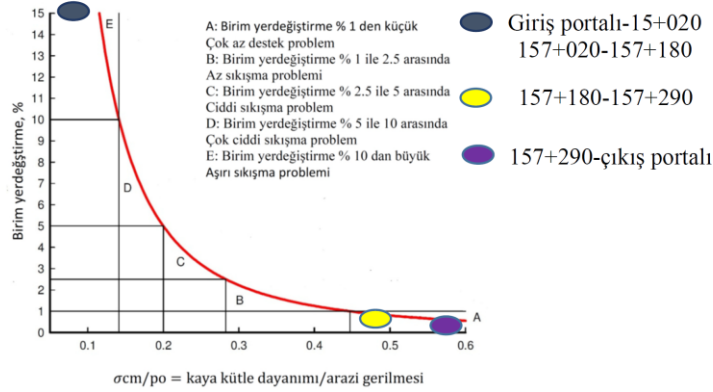
Sıkışma derecesi	N_c değeri aralığı
Yüksek	<0.4
Orta	0.4-0.8
Hafif	0.8-2
Sıkışma yok	>2

Hoek ve Marinos [25] ise sıkışmayı birim yerdeğiştirme değerine karşılık kaya kütlelerinin arazi gerilme oranına bağlı olarak tanımlamıştır. Birim yerdeğiştirme değeri ise denklem 2 ile belirlenmiştir.

$$\varepsilon = 0.2 * (\sigma_{cm} / p_0)^{-2} \quad (2)$$

Desteksiz durumda sıkışma durumu ve destek sistemi önerileri ise Şekil 5’de verilmiştir.

Tablo 3’de Jethwa vd. [24] ve Hoek ve Marinos [25] a göre hesaplanan değerler sunulmuştur. Tünelin tamamında Jethwa vd. göre orta derecede sıkışma öngörülmektedir. Hoek ve Marinos [25]’a göre, giriş portalı ile km:157+180 arasında çok büyük sıkışma problemi olacağı belirtilmiştir. Bu kesimlerde tünel tavanı ve tünel aynasında şemsiye tipi süren ile ayna bulonlarının olması gerektiği vurgulanmıştır. Km:157+180 ile çıkış portalı arasında ise çok az stabilite problemleri ile karşılaşılabilceği belirtilmiştir.



Şekil 5. Desteksiz durumda sıkışma durumu [25]

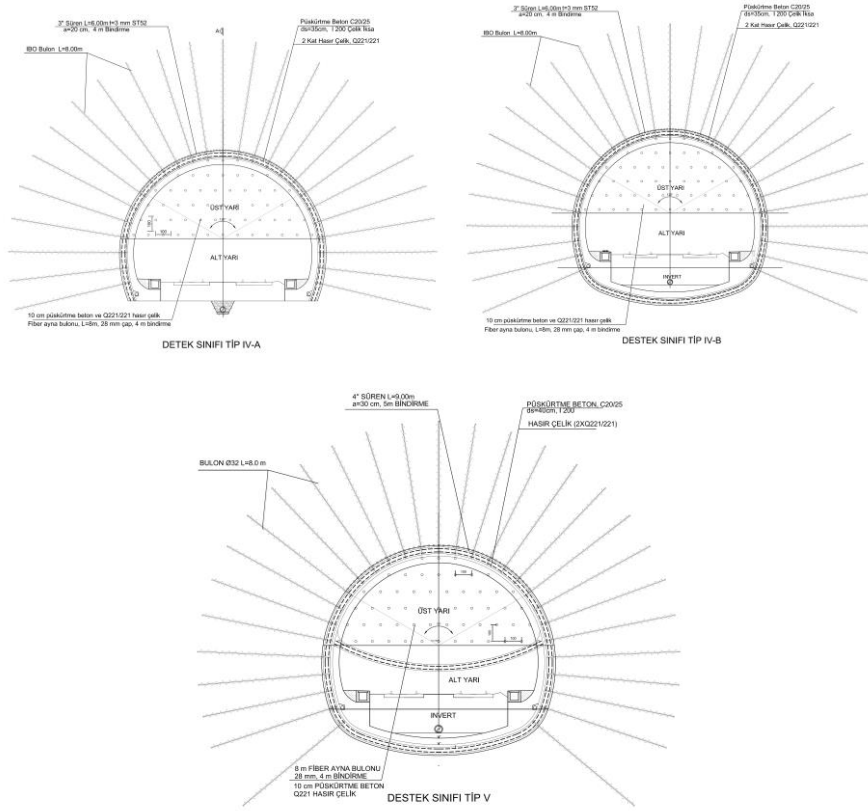
Tablo 3. Tünel sıkışma parametreleri

Kilometre	Örtü yüksekliği (m)	σ_{cm} (MPa)	P_o (MPa)	Nc (Jethwa vd. (1984))	ε (%) (Hoek and Marinos, 2000)
Giriş Portalı-157+020	30	0.036	0.72	0.05	80
157+020-157+180	30	0.036	0.72	0.05	80
157+180-157+290	24	0.482	0.624	0.772	0.33
157+290-Çıkış Portalı	24	0.361	0.624	0.578	0.59

4. Destek Sistemlerinin Değerlendirilmesi

Tünel destek sistemleri Şekil 6’da verilmiştir. Burada 3 ayrı destek sistemi uygulanmıştır. Tünel giriş portalı ile km:157+020 arasında taban koşullarının sağlam olması sebebi invertsiz tip olarak Tip IV-A destek sistemi, km:157+020 ile km:157+180 arasında ise tünelin tektonik zondan geçiyor olması sebebi ile Tip V destek sistemi, km:157+180 ile çıkış portal kesiminde ise tünel tabanının zayıf zonda kalması sebebi ile invertli Tip IV-B destek sistemi uygulanmıştır. Tip IV destek sisteminde RMR değerleri 24 ile 38 arasında değişmektedir. RMR değerinin 24 olduğu kesimde Tip IV-B invertli destek sistemi uygulanırken, RMR değerinin 35 ve 38 olduğu kesimde ise Tip IV-A invertsiz destek sistemi uygulanmıştır. Bu durum Aygar [23] tarafından belirtilen aynı kaya sınıfı içerisinde farklı destek sistemi uygulanabilir yorumuna uygun düşmektedir.

Tünel destek sistemlerinin incelenmesinde en kritik kesim olan km:157+040 ile 157+200 arası değerlendirilmiştir. Bu kesim çok zayıf kaya koşullarında açılmaktadır. Örtü yüksekliği ray üst kotundan itibaren 30 m'dir. Kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı 0.36 MPa olarak hesaplanmıştır. Tünelin bu kesiminde uygulanacak olan destek sistemi detayları Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Destek sistemi detayları-Tip IV-A, IV-B ve V

4.1. Destek sistemlerinin analitik yöntemler ile değerlendirilmesi

Tünel destek sistemlerinin belirlenmesi için Hoek ve Brown [26] tarafından verilen denklemler kullanılacaktır. Bu denklemler Tablo 4'de özetlenmiştir. Kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı, toplam yerdeğiştirme, plastik zon yarıçapı, birim yerdeğiştirme eşitlikleri ile hesaplanacaktır.

Km:157+040 ile km:157+180 arasında örtü yüksekliği 30 m olup, arazi gerilmesi $P_0=0.024 \cdot 30=0.72$ MPa olarak hesaplanmıştır. Bu kesimde kaya kütle dayanımı 0.036 MPa olup σ_{cm}/P_0 oranı ise 0.05 dir. Tünelin bu kesimi için kritik tünel basıncı P_{cr} ise 0.37 MPa'dır. Desteksiz durumda plastik zon yarıçapı ise tüm örtü yüksekliğini kapsamaktadır (Şekil 7). Bununla beraber tünel aynasında meydana gelen yerdeğiştirme ise 23 cm olarak bulunmuştur (Şekil 8). Tünel tasarımı için en önemli olan desteksiz durumda tünelde boyuna yönde meydana gelecek olan deformasyonların belirlenmesi gerekmektedir. Vlachopoulos ve Diedrichs [28] tarafından belirlenen denklemler yardımı ile boyuna deformasyon grafiği çizdirilmiştir (Şekil 8). Vlachopoulos ve Diedrichs [28]'e göre belirlenen hesaplamalar denklem 12 de gösterilmiştir. Burada tünel ayna önünde ve gerisinde desteksiz durumda meydana gelen yerdeğiştirmeler hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalarda tünel aynasında 22.8 cm yerdeğiştirme, 1 m gerisinde 28 cm, 10 m gerisinde 68 cm, 30 m gerisinde ise 117 cm yerdeğiştirme meydana gelmiştir (Şekil 8).

Tablo 4. Kapalı sistem denklemleri [26] [27]

	Denklem
σ_{cm} (3)	$\sigma_{cm} = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'}$
k (4)	$k = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'}$
p_{cr} (5)	$P_{cr} = (2P_0 - \sigma_{cm}) / (1 + k)$
u_{ie} (6)	$u_{ie} = r_0(1 + \nu)(p_0 - p_i) / E_m$
r_p ($p_i=0$) (7)	$r_p = r_0 \left[\frac{2(p_0(k-1) + \sigma_{cm})}{(1+k)((k-1)p_i + \sigma_{cm})} \right]^{\frac{1}{k-1}}$
u_{ip} (8)	$u_{ip} = \left(\frac{r_0(1 + \nu)}{E_m} \right) [2(1 - \nu)(p_0 - p_{cr}) \left(\frac{r_p}{r_0} \right)^2 - (1 - 2\nu)(p_0 - p_i)]$
ε (9)	$\varepsilon \% = \left(\frac{u_i}{r_0} \right) \times 100 = [0.2 - 0.25 \left(\frac{p_i}{p_0} \right) \left(\frac{\sigma_{cm}}{p_0} \right)^{2.4} \left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{-2}]$
r_p (p_i) (10)	$\left(\frac{r_p}{r_0} \right) = (1.25 - 0.625 \left(\frac{p_i}{p_0} \right) \left(\frac{\sigma_{cm}}{p_0} \right)^{0.57} \left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{-0.57})$

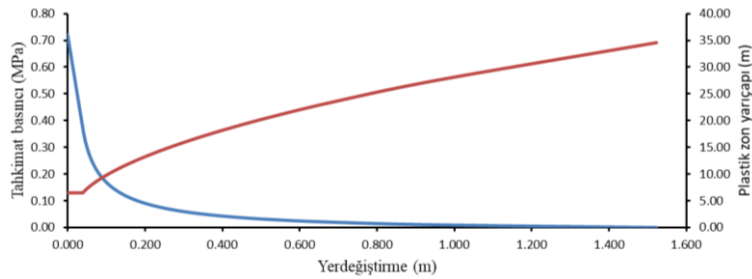
r_p = Plastik zon yarıçapı	σ'_1 = yenilme anındaki efektif eksenel gerilme
u_i = Yerdeğiştirme	σ'_3 = Efektif Yanal gerilme
r_0 = Tünel yarıçapı	c' = kohezyon
p_i = Tahkimat basıncı	ϕ' = içsel sürtünme açısı
p_0 = arazi gerilmesi	ν = Poisson oranı
σ_{cm} = Kaya kütle dayanımı	
E_m = Deformasyon modülü	

$$u_0^* = \frac{u_0}{u_{max}} = \frac{1}{3} e^{-0.15R^*}$$

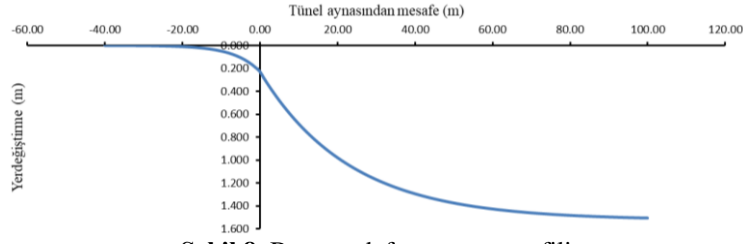
$$u^* = \frac{u}{u_{max}} = u_0^* e^{X^*} \quad \text{for } X^* \leq 0 \text{ (kaya kütleinde)} \quad (12)$$

$$u^* = 1 - (1 - u_0^*) e^{-\frac{3X^*}{2R^*}} \quad \text{for } X^* \geq 0 \text{ (tünelde)}$$

$$R^* = R_p / R_T$$



Şekil 7. Zemin reaksiyon eğrisi ve plastik zon yarıçapı



Şekil 8. Boyuna deformasyon profili

Tablo 5. Analitik çözüm sonuçları

Kilometre	Örtü yüksekliği h (m)	Kaya kütle tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	Arazi gerilmesi (MPa) P_0	σ_{cm}/P_0	Plastik zon yarıçapı r_p (m)	Tünel ayna deformasyonu u u_{if} (cm)	Kritik tahimat basıncı P_{cr} (MPa)
157+040 - 157+200	30	0.036	0.72	0.05	35	22	0.37

Tünel destek sistemlerinin kapasitelerini belirleme için Hoek [27] tarafından verilen denklemler kullanılmıştır (Tablo 6). Hesaplanan değerler ise Tablo 7'de verilmiştir.

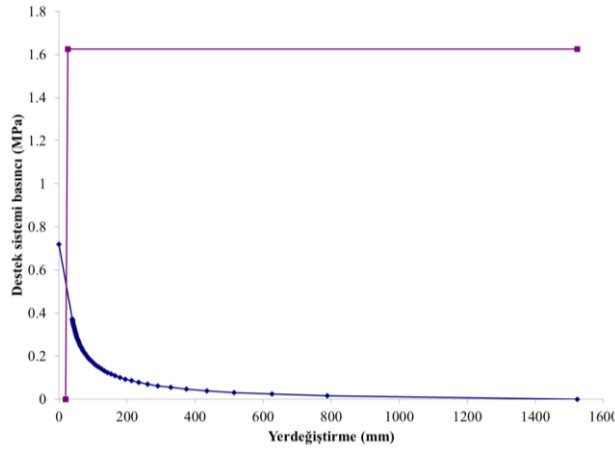
Tablo 6. Tahkimat kapasitesi denklemleri [26]

Destek sistemi özellikleri	Denklem
<p>Çelik iksa</p> <p>σ_{ys}: Çeliğin akma dayanımı (MPa) E_s: Çeliğin elastisite modülü (MPa) A_s: Kesit alanı (m²) s_1: Tünel eksenli boyunca mesafe (m) r_0: Tünel yarıçapı (m) P_{ssmaks}: Maksimum destek basıncı K_{ss}: Rijitlik</p>	$P_{ssmaks} = (A_s \sigma_{ys}) / (s_1 r_0^2)$ $K_{ss} = (E_s A_s) / (s_1 r_0^2)$
<p>Kaya bulonu</p> <p>d_b: Bulon çapı (m) l: Bulon veya ankrajın serbest uzunluğu (m) E_s: Bulon Elastisite modülü (MPa) s_c: Çevresel yönde bulon aralığı (m) s_1: Boyuna yönde bulon aralığı (m) T_{bf}: Bulon nihai yük P_{sbmaks}: Maksimum destek basıncı K_{ss}: Rijitlik</p>	$P_{sbmaks} = (T_{bf}) / (s_1 s_c)$ $K_{sb} = (E_s \pi d_b^2) / (4 s_1 s_c)$
<p>Püskürtme beton</p> <p>σ_{cc}: Tek eksenli basınç dayanımı (MPa) E_c: Elastisite modülü (MPa) ν: Poisson oranı t_c: Kaplama kalınlığı (m) R_0: Tünel yarıçapı (m) P_{scmaks}: Maksimum destek basıncı K_{ss}: Rijitlik</p>	$P_{scmaks} = \sigma_{cc} / 2 (1 - (r_0 - t_c) / r_0^2)$ $K_{sc} = (E_c (r_0^2 - (r_0 - t_c)^2) / (2(1 - \nu^2) / (r_0 t_c) r_0^2)$

Tablo 7. Dış destek tahkimat basınçlar ve rijitlik değerleri

Tahkimat tipi	p_{smaks} (MPa)	K_s (MPa/m)
Püskürtme beton ($d_s=40$ cm)	1.19	285
Çelik iksa (I 200)	0.188	16.36
Bulon (8 m, IBO)	0.25	20.810

Çelik iksa, püskürtme beton ve bulonlardan oluşan destek sisteminin toplam basıncı $P_t = 1.19+0.188+0.25=1.625$ MPa, rijitlik değeri ise $K_s=285+16.36+20.81=322.2$ MPa/m, deplasman kapasitesi $u=P/k=1.625/322=5.05 \times 10^{-3}$ m, deformasyon oranı (%) $\delta: u_{rmaks} / r_o = 5.05 \times 10^{-3} \text{ m} / 6.5 \text{ m} = \%0.76$ (u_{rmaks} : maksimum yer değiştirme; r_o : tünel yarıçapı) olarak hesaplanmıştır. Zemin ve destek sistemi reaksiyon eğrisi Şekil 9'da çizdirilmiştir. Plastik bölgenin yarıçapı 6.5 m olup, tünelde oluşan maksimum deformasyon toplam 22.1 mm olarak hesaplanmıştır. Güvenlik faktörü 3.1 olarak hesaplanmıştır.

**Şekil 9.** Zemin ve destek reaksiyon eğrisi

5. Sonuçlar

Yapılan çalışma kapsamında desteksiz durumda tünelde ciddi sıkışma probleminin olduğu ve plastik zonun tüm örtü yüksekliğini kapsadığı belirlenmiştir. Tünel tavanında yapılan uzun şemsiye tipi sürenler ile tünel aynasında yapılacak olan uzun fiber bulonlar ile tünel stabilitesi ana destekler yapılanaya kadar stabiliteyi sağlamalıdır.

Zayıf zeminlerde tünel kazısına başlamadan önce süren ve ayna bulonları hemen yapılmalıdır. Tünelde herhangi bir yenilmeye imkan verilmemelidir.

Destekli durumda plastik zon yarıçapı 6.5 m ye kadar düşmektedir. Ayrıca tünelde meydana gelen deformasyonlar ise 22 mm düzeyinde kalmıştır. Bu durum zayıf zeminlerde rijit bir tahkimatın gerekli olduğunu da göstermektedir. Aksi takdirde deformasyon trendi çok hızlı gelişecek ve tünelde plastik zonun artmasına da sebebiyet verecektir.

Destek ve zemin reaksiyon eğrisinden de (Şekil 9) görüleceği gibi, tünelde destek sistemleri öncesinde deformasyonlar en az düzeyde tutulmalıdır. Destekler hemen kazıdan sonra yapılarak tünel ringi minimum sürede kapatılmalıdır. Destek sistemlerinin gecikmesi durumunda destek-zemin reaksiyon eğrisinden de görüleceği gibi deformasyonlar çok hızlı gelişmektedir. Bu durumda tünelde göçüğe neden olabilecektir.

T10 tüneli zayıf zeminlerde açılmış sığ bir tüneldir. Tünel kritik tahkimat basıncı 0.37 MPa dır. Tünelde uygulanacak olan destek basıncı 1.6 MPa olup, kritik basıncın 5 katına yakındır. Zira tünel üzerinde kemerlenecek olan bir örtü de yoktur. Bu sebeple tahkimat basıncının yüksek

olması gerekmektedir. Jethwa vd. [24] öngörülerin sıkışan zeminlerde tahkimat basıncı kritik basınçtan en az 2-3 kat fazla olmalıdır görüşüne uymaktadır.

Aynı kaya sınıfı içinde farklı destek sistemleri kullanılmıştır. Giriş portalı ile km:157+020 arası ve km:157+180 ile çıkış portalı arası Tip IV kaya sınıfı olarak belirlenmiş olmasına rağmen Tip IV-A ve Tip IV-B tipi destek sınıfları belirlenmiştir.

Zayıf ve çok zayıf kayalarda belirlenen destek sistemlerinde tünel aynasına 1.0x1.0 m kare alanında fiber bulonlar önerilerek tünel aynası desteklenmiştir.

Tünel tavanı ise 3" ve 4" çaplarında şemsiye tipi süren uygulamaları ile tavanda oluşabilecek olan dökülmeler ve kaymalar önlenmiştir. Zira tavanda meydana gelebilecek bir göçmenin örtü yüksekliğinin az olması sebebi ile yüzeye kadar yansıma olasılığı vardır.

Belirlenen destek sistemleri Hoek ve Marinos [25] tarafından önerilen destek elemanları ile uyumludur.

Zayıf zeminlerde ve sığ örtü altında açılan tünellerde ring kapama işlemi hemen yapılmalı ve tünelde deformasyonların sönümlenmesi beklenilmeden iç kaplama betonu yapılarak tünel stabilitesi sağlanmalıdır. Aksi takdirde uzun dönemde sıkışmaya bağlı olarak oluşabilecek deformasyonlar geçici tahkimatlarda ciddi sıkıntılara sebebiyet verecektir.

Tünel destek sistemleri belirlenirken zemin davranışının çok iyi belirlenmesi gerekir. Belirlenecek destek sistemleri ile destek reaksiyon eğrisi ile optimum destek basıncı belirlenmelidir.

Zayıf zeminlerdeki en önemli handikap tünel kazısından sonra tünel aynasında destek elemanları yapıldıkça kadar geçen sürede oluşan deformasyonlardır. Bu durumun önüne geçilmesi için ayna bulonları ve şemsiye tipi sürenler ile ayna stabilitesini kısa dönemde sağlamalıdır.

Kaynakça

- [1] Z.T. Bieniawski, "Engineering classification of jointed rock masses," *Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs* 15, 335-344. 1973.
- [2] Z.T. Bieniawski, "Rock mass classification in rock engineering," *In Exploration for rock engineering, proc. of the symp., (ed. Z.T. Bieniawski)* 1, 97-106. Cape Town: Balkema. 1976.
- [3] Z.T. Bieniawski, *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley. 1989.
- [4] N.R. Barton, R. Lien, J. Lunde, "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support," *Rock Mech.* 6(4), 189-239. 1974.
- [5] N. R. Barton, F. Løset, R. Lien, J. Lunde, "Application of the q-system in design decisions," *In Subsurface space, (ed. M. Bergman)* 2, 553-561. New York: Pergamon.1981.
- [6] N.Barton, "Application of q-system and index tests to estimate shear strength and deformability of rock masses," *In Workshop on Norwegian Method of Tunnelling*, pp. pp 66-84, New Delhi, India,1993.
- [7] L.v Rabcewicz, "The new austrian tunnelling method, Part One," *Water Power*, pp 453-457, 1964.
- [8] L.v. Rabcewicz, "The new austrian tunnelling method, Part Two," *Water Power*, pp 511-515, 1964.
- [9] L.v. Rabcewicz, "The new austrian tunnelling method, Part Three," *Water Power*, pp 19-24, 1965.
- [10] L.v. Rabcewicz, J. Golser, "Principles of dimensioning the supporting system for the "new austrian tunnelling method," *Water Power*, Marc, 88-93. 1973.
- [11] L. Müller, "Removing misconceptions on the new austrian tunnelling method," *Tunnels & Tunnelling International*,10(8):29-32. 1978.
- [12] E.B. Aygar, C. Gökçeoğlu, "Ankara-istanbul yüksek hızlı tren projesi, t13 tüneli fay zonunda karşılaşılan sorunlar ve çözüm önerileri ankara-istanbul high speed railway project, the problems encountered at t13 tunnel fault zone and solution suggestions," *IMCET 2019 / Antalya / Turkey / April 16. 19, Proceedings 26th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, 2019.*

- [13] E.B. Aygar, C. Gökçeoğlu, "Problems encountered during a railway tunnel excavation in squeezing and swelling materials and possible engineering measures: a case study from turkey," *Sustainability*, 12, 1166, <https://doi.org/10.3390/su12031166>, 2020.
- [14] E.B. Aygar, "Evaluation of new austrian tunnelling method applied to bolu tunnel's weak rocks," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12, 541-546, 2020.
- [15] E.B. Aygar, C. Gokceoglu, "Effects of portal failure on tunnel support systems in a highway tunnel." *Geotech Geol Eng*, 39, 5707-5726. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01859-z>. 2021
- [16] C.O. Aksoy, K. Ogul, I. Topal, S.C.Ozer, V. Ozacar, E. Posluk, "Numerical modelling of non-deformable support in swelling and squeezing rock," *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 52, 61-70, doi:10.1016/j.ijrmm.2012.
- [17] E.B. Aygar, S.Karahan, S. Gullu, C. Gokceoglu, "Analytical and numerical analyses of the support system for a large-span tunnel in challenging and seismically active ground conditions," *Transportation Infrastructure Geotechnology*, <https://doi.org/10.1007/s40515-022-00251-5>.2022.
- [18] G. Barla, "Full face excavation of large tunnels in difficult conditions," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, <http://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.12.003>.2015.
- [19] E. Hoek, "Tunnel support in weak rock," *In: Symposium of Sedimentary Rock Engineering*, 631, 1-13. 1998.
- [20] G. Barla, "Tunnelling under squeezing rock conditions," *Tunnelling Mechanics-Advances in Geotechnical Engineering and Tunnelling*, 2011.
- [21] P. Lnardri, "Design and construction tunnels-ADECO-RS approach," *Tunnels and Tunnelling Internations, Special Supplement May*, 2000.
- [22] P.Lunardi, R. Bindhi, "The evaluation of reinforcement of the advance core using fiber glass elements for short and long term stability of tunnels under difficult stress-strain conditions: design, technologies and operating methods," *Progress in Tunnelling after 2000, AITES-ITA 2011 World Tunnel Congress*, 2, 309-322. 2001.
- [23] E.B. Aygar, "Tünel projelendirilmesinde kullanılan yöntemler (ampirik, analitik ve nümerik yöntemler), kısıtlamaları, karşılaştırılması ve öneriler," *Demiryolu Mühendisliği*, doi:10.47072/demiryolu.1030404.2022
- [24] J.L. Jethwa, A.K. Dube, B.Singh, B.Sing, "Squeezing problems in Indian tunnels," *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 1984.
- [25] E. Hoek, P. Marinis, "Predicting tunnel squeezing," *Tunnels and Tunnelling International*. Part 1 – November 2000, Part 2 – December, 2000.
- [26] E. Hoek, E.T. Brown, "Underground excavations in rock," *London:Instn Min. Metall*, 1980.
- [27] E.Hoek. "Rock support interaction analysis for tunnels in weak rock masses," <https://www.rocscience.com/documents/pdfs/rocnews/winter2012/Rock-Support-Interaction-Analysis-for-Tunnels-Hoek.pdf>. 2012.
- [28] N. Vlachopoulos, M.S. Diedrichs, "Improved longitudinal displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels," *Rock.Mech.&Rock Eng*.42:2,131-136. 2009.

Özgeçmiş



Ebu Bekir AYGAR

Ebu Bekir Aygar, 1973 Ankara doğumlu olup, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünde 1996 Lisans, 2000 Yüksek Lisans ve 2007 de Doktora eğitimini tamamlamıştır. Fugro Sial Müş. ve Müh. Ltd. şirketinde 2009 yılından itibaren Tünel Tasarım Bölüm Müdürü olarak görev yapmaktadır. Uzmanlık alanı olarak Tünelcilik, NATM, Kaya Mekaniği, Nümerik Analizler olarak sıralanabilir. Yazarın ulusal ve uluslararası olmak üzere yayınları mevcuttur. Yazar Türkiye’de ve yurtdışında farklı yüksek hızlı demiryolu ve karayolu tünel projelerinde proje müdürü olarak çalışmıştır.
E-Posta: eaygar@gmail.com

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.