



Original Research / Orijinal Araştırma

Zayıf zeminlerde açılan büyük çaplı çift tüp tünellerin birbirine olan etkisinin 3 boyutlu sayısal analizlerle incelenmesi, Bolu Tüneli örneği

An analysis of interaction between large diameter double tube tunnels excavated in weak soils through 3D numerical analysis; An example of Bolu Tunnel

Ebu Bekir Aygar^{a,*}^aFugro Sial Yerbilimleri Müşavirlik ve Mühendislik Ltd. Şti., Ankara, TÜRKİYE

Geliş-Received: 7 Ocak - January 2022 * Kabul-Accepted: 9 Mayıs - May 2022

ÖZ

Bolu Tüneli Ankara İstanbul Otoyolu üzerinde yer almaktadır. Bolu Tüneli proje çalışmalarına 1993 yılında başlanmış olup 2007 yılında trafiğe açılmıştır. 3 şeritli çift tünel olarak projelendirilmiştir. Tünel uzunlukları sağ tünel 2788 m sol tünel 2954 m'dir. Bolu Tüneli inşası sırasında 2 kez sel ve depreme maruz kalmış ve Elmalık kesiminde Düzce Depreminde göçük yaşanmıştır. Göçük sonrasında güzergah değiştirilmiştir. Bolu Tüneli Kuzey Anadolu Fay Hattı ile Düzce Fayı arasındaki tektonik bloktan geçmektedir. Tünelin İstanbul tarafı (Asarsuyu) metakristalin temel kayaları içerisinde yer almakta iken Ankara tarafı (Elmalık) sedimanter kayalar içerisinde bulunmaktadır. Tünelde kazı aşamasında kritik sorunların meydana geldiği Elmalık girişinde Elmalık fayı bulunmakta olup, tünelin bu bölümlerinde 1,2 m'ye varan deformasyonlar oluşmuştur. Düzce Depreminde ise Elmalık sol tünel tamamen kapanarak göçük oluşmuştur. Bolu Tünellerinde yaşanan sorunlar ve destek sistemleri tünelcilik açısından çok değerli bilgiler içermektedir. Bu çalışmada, destek sistemleri Flac3d programı ile 3 boyutlu olarak incelenmiş, iki tünelin birbirine olan etkisi, üst yarı, alt yarı ve invert kazılarında meydana gelen değişimler ortaya konmuştur.

Keywords: Bolu Tüneli, Göçük, Flac3d, Düzce Depremi, Tünel etkileşimi

ABSTRACT

Bolu Tunnel is located on the Ankara İstanbul Highway which started in 1993 and was made available to traffic in 2007. It was built as 3-lane double tunnel. The tunnel lengths of the right and left tunnel are 2788 m and 2954 m respectively. During the construction, it was undergone 2 earthquakes and flooding, and the Elmalık section collapsed after the Düzce Earthquake. After collapse, the route diverted. The tunnel passes through the tectonic block between the North Anatolian Fault and Düzce Fault. The Istanbul side (Asarsuyu) is located within the metacrystalline basement, the Ankara side (Elmalık) is located within the sedimentary rocks. The biggest problems during the excavation of the tunnel located Elmalık fault where deformations up to 1.2 m and collapsed in the earthquake. The problems and support systems in the tunnels contain very valuable information for tunneling. In this study, the supports are examined in 3D with the Flac3d program, the effect of the two tunnels on each other, the deformation changes in the top heading, bench and invert excavations are studied.

Keywords: Bolu Tunnel, Collapse, Flac3d, Düzce earthquake, Tunnel interactions

Giriş

Zayıf zeminlerde açılan tünellerin destek sistemlerinin belirlenmesi için yapılan çalışmalar günümüzde giderek artmaktadır (Barla 2002, 2016, Hoek 2001, Aygar ve Gökçeoğlu 2020, 2021 a, b, c ve d, Aygar 2000, 2007, 2020, 2021a, 2021b). Zayıf zeminlerde açılan tünellerde yaşanan sorunlara bakıldığında zaman sıkış-

ma ve şişme problemleri ile karşılaşıldığı görülmektedir. Buna ek olarak, tünel ayna ve tavan desteklenmesi sırasında karşılaşılan sorunlar da tünel duraylılığını etkilemektedir. Sıkışma için tünel örtü yüksekliği ve kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı temel faktörler olarak karşımıza çıkmaktadır (Jethwa vd. 1984, Sakurai 1983, Singh vd. 1992, Goel vd. 1995, Hoek ve Marinos 2000).

* Corresponding author: eaygar@gmail.com • https://orcid.org/0000-0002-5738-4602

https://doi.org/10.30797/madencilik.1054714

Zayıf zeminler için destek sistemlerinin tasarımında iki ana yaklaşım üzerinde durulmaktadır: aktif ve pasif destek sistemi tasarımı. Bunlardan ilki olan aktif destek sistemi tasarımında deformasyona izin verilmeden rijit bir tahkimat uygulanırken pasif yaklaşımda ise deformasyona müsaade edilerek esnek bir tahkimat uygulanmaktadır. Schubert (1996) yaptığı çalışmada iksalar üzerinde deformasyon boşluğu önermiştir. Hoek (2007, 2012) ise meydana gelen deformasyonlar için TH tipi kayan iksalar önermiş ayrıca tünel ayna ve tavan duraylılığının önemi üzerinde durmuştur. Ayrıca zayıf zemin içinde çift tüp olarak açılan geniş çaplı tünellerde ise iki tünelin birbirine olan etkisi önem kazanmaktadır. Tünellerin kazıları sırasında iki tüp aynası arasında belirli bir mesafe bırakılması önerilir. Buna ek olarak iki tünel arasındaki topuk mesafesi ise en az tünel çapının 1,5 katı olacak şekilde bırakılması önerilir (KGM, 2013). Tünel kazısı sırasında ise Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi (NATM) (Rabcewicz, 1964 a, b and 1965; Rabcewicz and Golser, 1973) prensiplerine göre tünel üst yarı, alt yarı ve invert kazıları bölümlendirilmektedir. Zira tünel kazısının tek aşamada yapılması mümkün olamamaktadır. Bu durumda ise üst yarı, alt yarı ve invert kazıları arasındaki mesafe çok önem kazanmaktadır. Sağlam kayalarda bu mesafe 100 ila 200 m'ye kadar çıkarken zayıf kayalarda bu değer 20-25 m'ye kadar düşmektedir. Son dönemlerde ise İtalyan yöntemi olarak karşımıza çıkan "kaya ve zeminlerde deformasyon kontrollü analiz" (ADECO-RS) yöntemi tam kesit kazı prensibine göre destek sistemi yapılmaktadır Lunardi 2000a, 2000b, 2008, 2014, 2016, Barla 2002). ADECO-RS yönteminde tünel ayna ve tavan duraylılığı çok önemlidir. Bunun için tünel aynasında uzun fiber bulonlar çakılarak ayna tamamen duraylı hale getirilmektedir. Bu aşamadan sonra tam kesit tünel kazı işlemi yapılmaktadır.

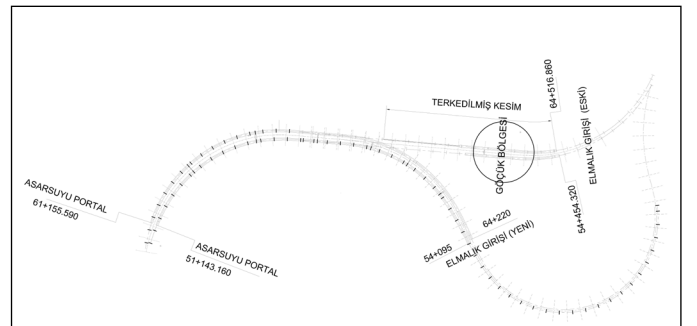
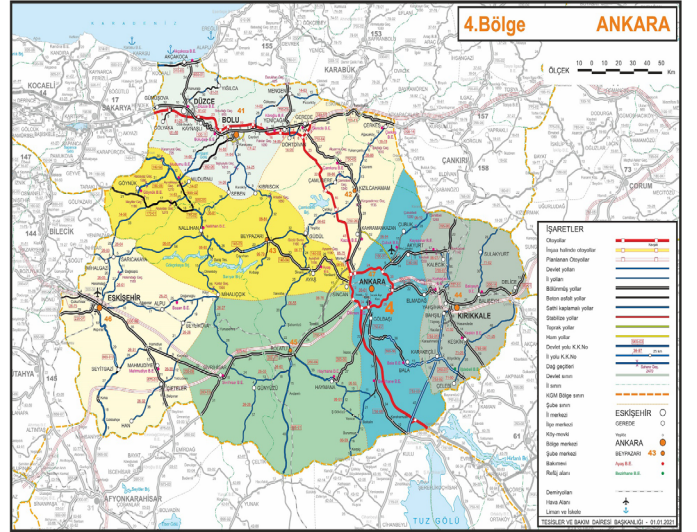
Bu çalışma kapsamında, zayıf zeminlerde açılan tünellerde kazı kademeleri ile tünellerin birbirine olan etkisinin incelenmesi amacıyla Bolu Tünellerindeki uygulamalar dikkate alınmıştır. Bunun için 3 boyutlu analiz imkanı sunan Flac3d (Itasca, 2002) programı kullanılarak tünel kazı kademeleri ile iki tünelin birbirine olan etkisi incelenmiştir. Bilindiği üzere Bolu Tüneli yapımı 13 yıl süren, kazı çapı 18 m'ye varan geniş çaplı çift tüpten oluşan bir tüneldir. Kazı işlemi üst yarı, alt yarı ve invert şeklinde olup tüneller arasında 55 m ile 60 m arasında değişen mesafe bırakılmıştır. Kazı işlemi sırasında tünellerde ciddi deformasyonlar ile karşılaşmış ve tünel destek sistemlerinde stabilite ve göçük problemleri ile karşılaşmıştır. Bu sebeple Bolu Tünellerinde yapılan uygulamalar zayıf kaya kütlelerinde açılan tüneller için çok önemli veriler içermektedir.

1. Bolu Tüneli

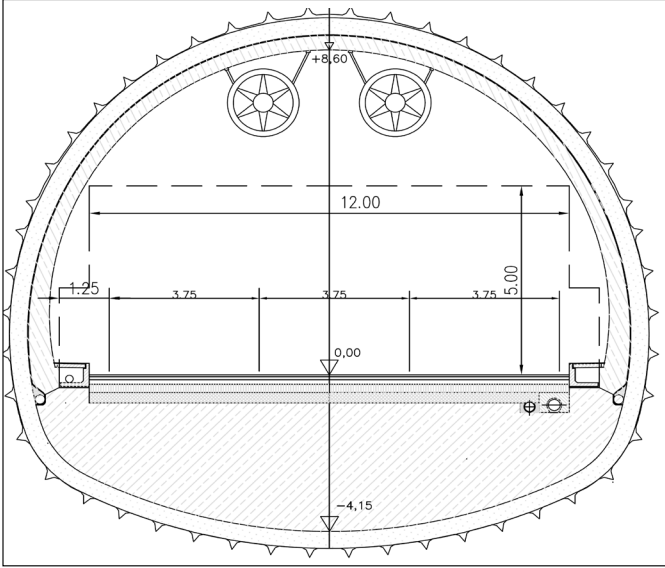
Bolu Tüneli Ankara-İstanbul Otoyolu içerisinde yer almakta olup, 3 şeritli çift tünelden oluşmaktadır. İstanbul tarafında (Asarsuyu girişi) kazı işlemleri 1993 yılında, Ankara tarafında (Elmalık girişi) ise 1994 yılında kazı işlemlerine başlanmıştır. Tünel kazı işlemleri 2006 yılında tamamlanarak 2007 yılında trafiğe açılmıştır (Şekil 1). Kazı işlemleri toplam 13 yıl sürmüştür. Tüneller arasında 50 ila 60 m arasında değişen topuk bırakılmıştır. Tünel örtü yüksekliği genelde 100 ila 150 m arasında değişmekte olup, en yüksek örtü yüksekliği ise 250 m'dir. Tünel kazı çapı destek sınıflarına bağlı olarak 13 m ile 18,2 m arasında değişmektedir. Kazı alanı ise 133 m² ile 260 m² arasındadır. Tünellerin tamamlanmış halinde yatay açıklık olarak 14,0 m ve yükseklik ise 8,60 m'dir (Şekil 2).

Bolu Tünelleri Yeni Avusturya Tünelcilik (NATM) Yöntemine göre projelendirilmiştir. Projelendirme aşamasında sıkışan kayadan çok sağlam kaya sınıfına kadar destek sistemleri belirlenerek kazı işlemlerine başlanmıştır. Tünel kazısı sırasında

ise beklenmeyen jeolojik koşullara göre deformasyonlarda ciddi artışlar gözlenmiştir. Bu artışlar yer yer Elmalık girişinde yeralan filiş serileri ile kısa fay zonlarının toleransın 4 ile 5 katına kadar çıkmıştır. Karşılaşılan yeni jeolojik koşullara göre tünel destek sistemleri sürekli olarak revize edilmiştir. Destek sistemlerinde yapılan bu değişiklikler ilk dönemlerde NATM prensipleri içerisinde kalarak devam etmiş ancak başarı sağlanamamıştır. 1998 yılı itibarı ile de NATM prensiplerinin dışına çıkılarak esnek bir dış kemer ilkesinden vazgeçilmiştir. Yapılan bu revizyonlarda kaplama kalınlığının tamamen artırılması yönüne doğru gidilmiştir. Bu amaçla kısa fay zonlarında dış kaplama ile iç kaplama arasında ara kaplama eklenmiş (Seçenek 3), uzun fay zonlarında ise alt yarı pilot tünel yöntemi (Seçenek 4) kullanılmıştır. 12 Kasım 1999 Düzce depreminde meydana gelen göçük sonrasında ise bu yöntemlerin uygulanmasına devam edilmiştir. Düzce depreminde Elmalık girişinde yaşanan göçük incelendiğinde deformasyonların devam ettiği ve sönümlenemediği bölgede oluştuğu gözlenmiştir. Bu bölgede iç kaplaması yapılan ilk 400 m lik kesimde ise herhangi bir hasar meydana gelmemiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Bolu Tüneli yer bulduru haritası



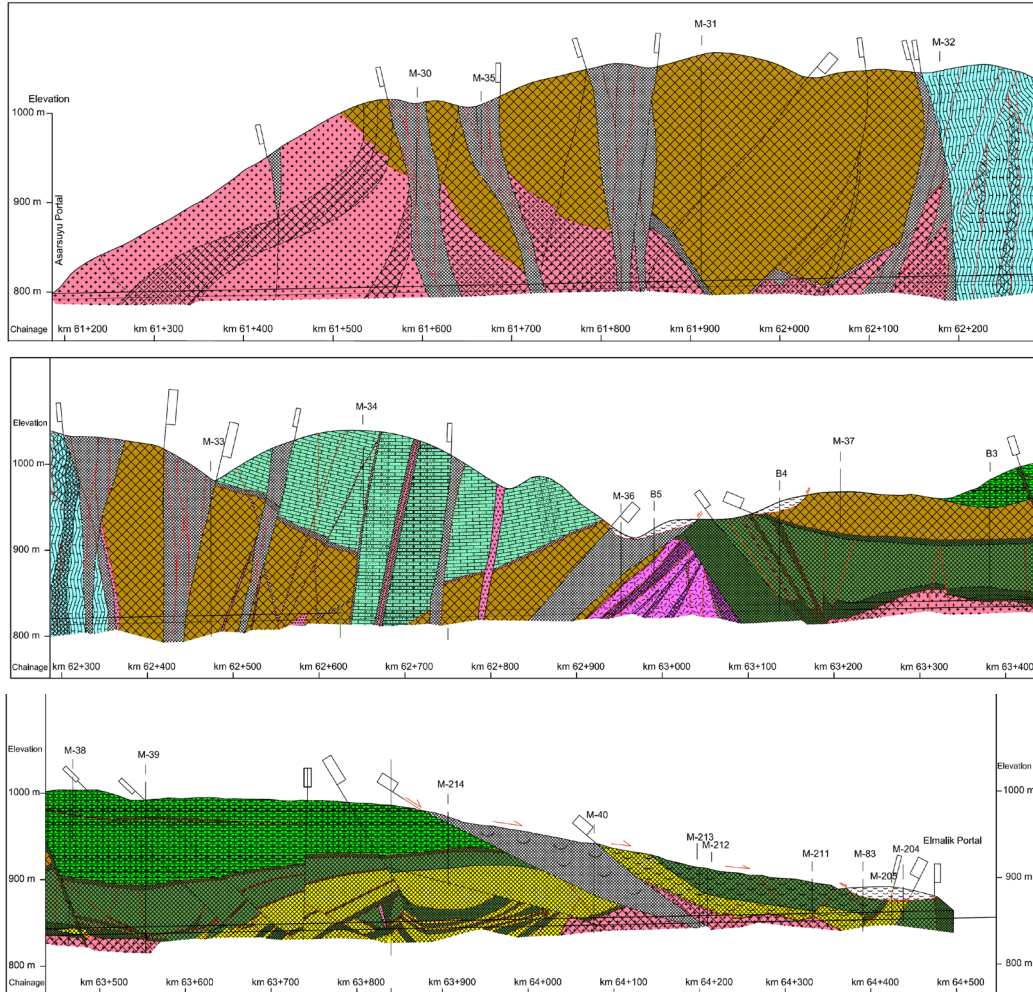
Şekil 2. Bolu Tüneli en kesiti

2. Jeolojik-Jeoteknik Koşullar

Bolu Tüneli güzergah boyunca tektonizmaya uğramış birimler içerisinde açılmıştır. Tüneli etkileyen ana fay sistemleri 1. Derece aktif fay sistemleridir. Bolu Tüneli boyunca yeralan birimler iki gruba ayrılabilir. İlk grup İstanbul girişinde (Asarsuyu) Metakristalin

kayalardan oluşmakta olup genelde metasediman seriler içerisinde açılmıştır. Bu bölüm Bakacak fay zonunun tüneli kestiği yaklaşık km:62+800 e kadar olan bölgeyi kapsamaktadır. Bu noktadan sonra ise Ankara girişinde (Elmalık) yeralan filiş serisini kapsamaktadır. Bu bölgede düşük açılı faylar ile kesilmiş olup bu iki grup arasında yaklaşık 200 m uzunluğundaki Bakacak fayı bulunmaktadır. Elmalık girişinde tüneli olumsuz etkileyen alttaki metakristalin tabaka üzerinde yeralan üstteki sedimanter serisi içerisindeki düşük açılı faylardır. Tünel kazısı ise genelde bu bölümde yapılmış olup beklenmeyen aşırı deformasyonlara neden olmuştur. Elmalık tarafında karşılaşılan filiş serileri tektonizmaya uğramış kilitaşı, silttaşı ve kireçtaşı birimlerinden oluşmaktadır. Bu kesim genel olarak kaygan yüzeyli ve yüksek plastik özelliklere sahip fay kili malzemesi içermektedir. Tüneli olumsuz etkileyen Bakacak fayı için ise Lettis vd (2000) tarafından yapılan çalışmada fayın uzunluğunun 10 ile 15 km arasında değiştiği belirtilmiştir ve tüneli 200 m'lik bir kesimde kestiği belirtilmiştir. Fayın yönelimi yaklaşık olarak doğu-batı yönünde olup tüneli km:62+800 ile 63+000 arasında dik olarak kesmektedir. Bu fay zone kırmızı renkli yüksek plastik özellikli olup büyük oranda kaygan yüzeylere sahiptir.

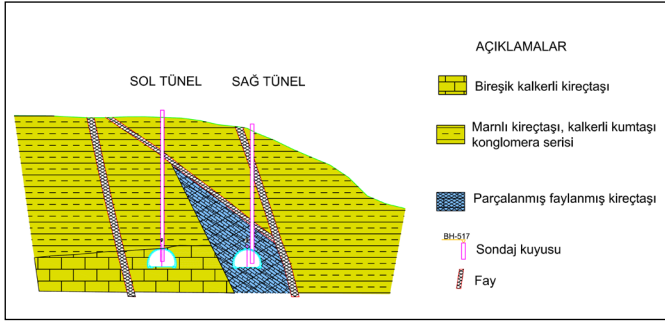
Bolu tüneli 4 ana bölüme ayrılabilir. Bunlar metakristalin tabaka (Yedigöller formasyon), metasediman serileri (İkizoluk formasyonu), Filiş serisi (Fındıcak Formasyonu) ve killi fay zonları olarak ayrılabilir (Dalgıç, 2002). Bolu Tüneli'nde sayısal analiz çalışmaları için metakristalin tabaka ile filiş serileri içinde geçilen bölümler incelenmiştir. Bu bölümlerin örtü yükseklikleri filiş serisinde 50 m, metakristalin tabaka için ise 100 m'dir. Şekil 3'te Bolu Tüneli'ne ait jeolojik profil verilmektedir.



Şekil 3. Bolu Tüneli jeolojik profili (Geoconsult,1998)

2.1. Filiş serisinin jeolojik ve jeoteknik özellikleri

Filiş serisi içinde geçilen bölüm tünelin Elmalık girişine yakın kısmında olup km:63+910 ile 64+120 arasında yer almaktadır. Tünelin bu bölümü, temelde düşük plastik özellik gösteren filiş serisinde kazısı yapılmış kiltası, kumtaşı ve marnlı kireçtaşı içermektedir. Marnlı kireçtaşı ve biresik kalkerli kumtaşı az dereceden orta dereceye kadar bozunmuş, zayıftan orta dereceye kadar değişen dayanıma sahiptir. Kiltası tabakaları ise yüksek oranda bozunmuş ve oldukça zayıf özelliklere sahiptir ve bloklu malzeme ile ince matriksler halindedir. Matriks, toplam kütleinin %20 ila 40'ını oluşturmaktadır. İnce matriksler killi kumlu silt yapılarından oluşmaktadır. Şekil 4'de bu bölüme ait jeolojik kesit sunulmaktadır. Çizelge 1'de kaya kütle parametreleri verilmektedir (Geoconsult, 2002).



Şekil 4. Filiş serisi içinde geçilen bölümün jeolojik kesiti

Çizelge 1. Filiş serisine ait zemin parametreleri (Geoconsult, 2002)

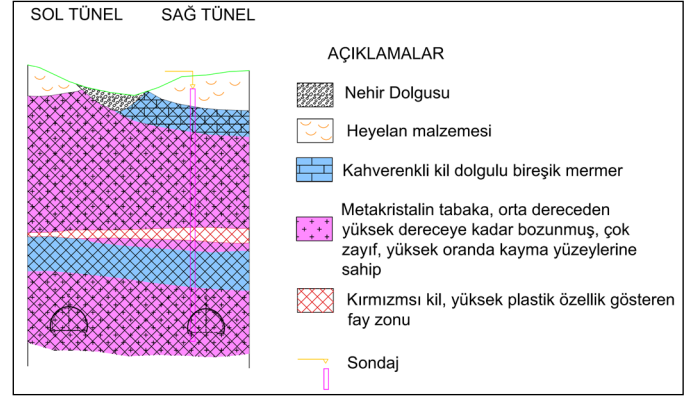
İçsel sürtünme açısı	Kohezyon	Young modülü	Hacimsel modül	Makaslama modülü	Birim hacim ağırlık
20°	50 kPa	493 MPa	411 MPa	190 MPa	22 kN/m ³

2.2. Metakristalin tabakanın jeolojik ve jeoteknik özellikleri

Metakristalin tabaka içinde geçilen bölüm km: 62+890 ile 63+080 arasında yer almaktadır. Kaya kütleli amfibolitler ile beyaz renkli sağlam kuvars içinde makaslama bölümlerine sahiptir. Bu bölüm kahverengi yeşil ve gri renkli orta dereceden yüksek dereceye kadar bozunmuş olup oldukça zayıf özelliklere sahiptir. Şekil 5'te metakristalin tabakaya ait jeolojik kesit sunulmaktadır. Sayısal modellemelerde kullanılan bölüme ait zemin parametreleri Çizelge 2'de verilmektedir (Geoconsult, 2002).

Çizelge 2. Metakristalin tabakaya ait zemin parametreleri (Geoconsult, 2002)

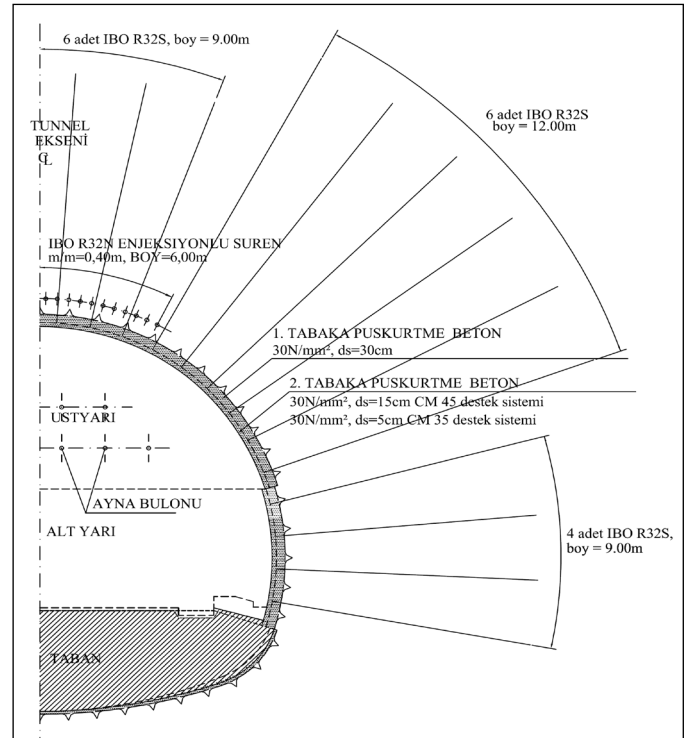
İçsel sürtünme açısı	Kohezyon	Deformasyon modülü	Hacimsel modül	Makaslama modülü	Birim hacim ağırlığı
25°	50 kPa	1000 MPa	833 MPa	384 MPa	22 kN/m ³



Şekil 5. Metakristalin tabaka içinde geçilen bölümün jeolojik kesiti

3. Sayısal Analizler

Sayısal analiz çalışmalarında FLAC^{3D} programı kullanılmıştır. Flac3D programı sonlu farklar metodu ile çalışan bir sayısal analiz programıdır (Itasca, 2002). 3 boyutlu olarak zemin, kaya ve diğer yapı elemanlarını modelleyebilmektedir. Tünel analizlerinde kullanılacak olan yapısal elemanlar modele tanımlanabilmektedir. Modelde kazı işlemi üst yarı, alt yarı ve invert şeklinde modellenmekte ve destek elemanları da modele tanımlanabilmektedir. Sayısal analizler için Bolu Tüneli'nde CM35 ve CM45 destek sınıfları seçilmiş olup (Şekil 6), bu kesimler sırasıyla metakristalin tabaka ile filiş serisi içerisinde yer almaktadır. Püskürtme beton kalınlıkları sırası ile 35 cm ve 45 cm olup 9 m ile 12 m uzunluklarında kendinden delgili bulonlar kullanılmıştır. Tavan kesiminde ise süren olarak IBO tipi bulonlar kullanılmıştır.



Şekil 6. CM 35 ve CM 45 destek sistemi detayları (Aygar, 2020)

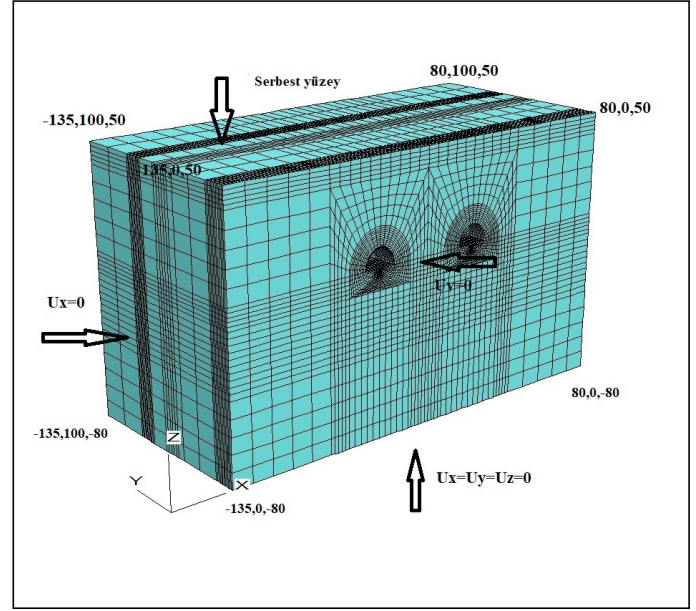
3.1. FLAC^{3D} programı ile statik analizler için yapılan modelleme çalışmaları

Statik çözümler için FLAC^{3D} programı ile oluşturulan modellerde tünel kazı ve destek sistemleri modellenmiştir. Modelleme sonuçları değerlendirilerek tünelde meydana gelen yenilme durumu ve yerdeğiştirmeler incelenmiştir.

Statik durumda meydana gelen değişimler ve elde edilen sonuçlar tünel kazısı ve destek sistemlerinin değerlendirilmesi açısından önemlidir. Zira oluşturulan modeller Bolu Tünelleri'nde uygulanan kazı ve destek sistemi ile örtüşmektedir. Bundan dolayı statik durumda meydana gelen değişimlerin incelenmesi destek ve kazı sisteminin doğruluğu açısından önem kazanmaktadır.

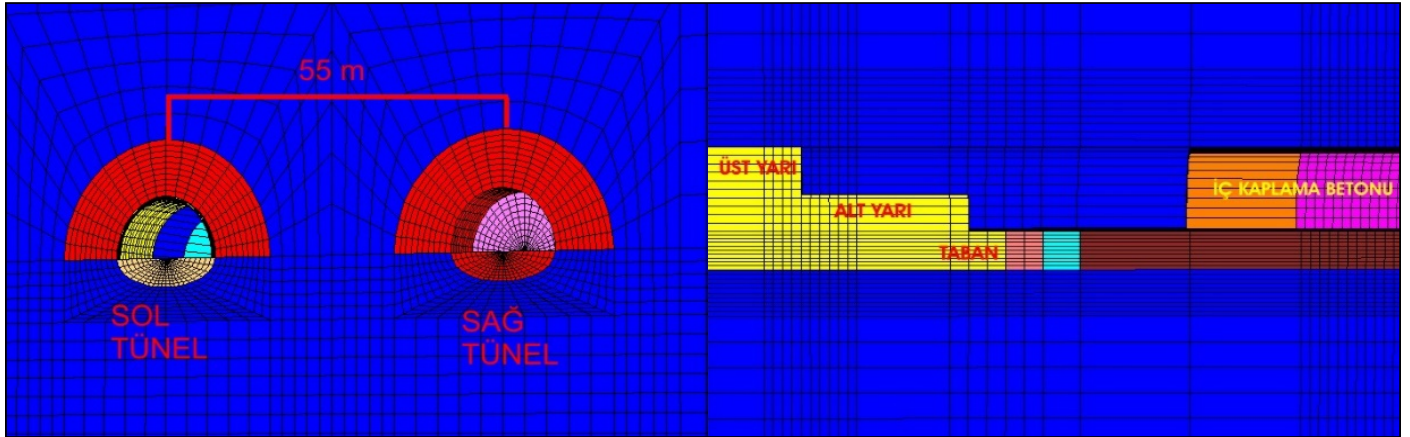
Bolu tünelleri için normal arazi koşullarına uygun olacak şekilde modeller oluşturulmuştur. Modelin tünel başlangıç noktaları 0 olarak kabul edilmiştir. Modelde sol tünel başlangıç noktası 0,0,0 sağ tünelde ise 0,55,0 olarak alınmıştır. Kazı işlemleri 0'dan itibaren Y eksenini boyunca yapılmıştır.

Modelleme sırasında yerçekimi ivmesi kullanılarak başlangıç gerilmeleri oluşturulmuştur. Oluşturulan model invertte x, y, z yönlerinde sabitlenirken, sol ve sağ yüzeyleri x yönlerinde, modelin ön ve arka yüzeyleri y yönünde sabitlenmiş ve tavan ise sabitlenmemiştir (Şekil 7). Modellemelerde sınır koşulları ile açıklık etkileşimini önlemek için, en büyük açıklığın yükseklik veya genişliğinden en az 4 ila 5 misli mesafede olması gerekmektedir. Bundan dolayı modelin sol tarafında 80 m, sağ tarafında ise 135 m, invert bölümünde ise 80 m mesafe bırakılarak modellemesi yapılmıştır. Model derinliği, y eksenini diğer bir ifadeyle tünel eksenini yönünde 100 m olarak alınmıştır. Tünel çapının 16 m olduğu göz önüne alındığında modelde sınır koşulları uygun olmaktadır.



Şekil 7. Oluşturulan modelde sınır koşulları

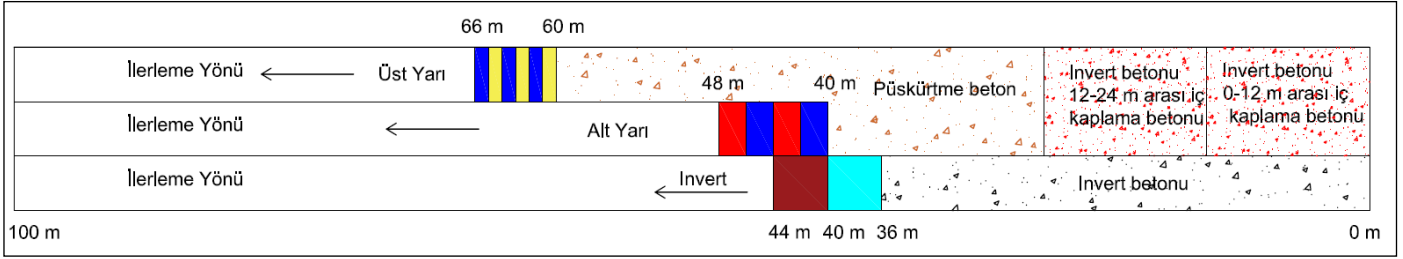
Modelde arazi koşullarına uygun olarak sağ ve sol tünel arasında eksenden eksene 55 m mesafe bırakılmıştır. Tünel kazısı üç aşamada yapılmaktadır. Bu aşamalar üst yarı, alt yarı ve invert kazısı şeklindedir. Modellemede tünel kazısı uygulama aşamasında olduğu gibi üç aşamada yapılmıştır (Şekil 8).



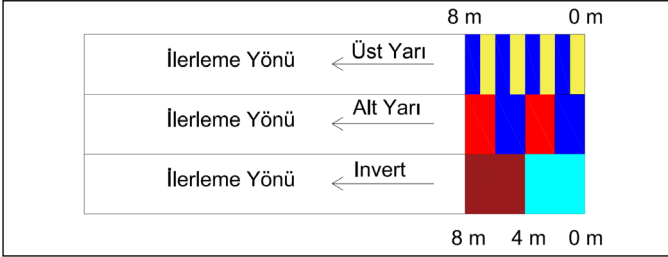
Şekil 8. FLAC^{3D} programı ile oluşturulan modelde tüneller arasında bırakılan mesafe

Tünellerde üst yarı, alt yarı ve invert kemeri kısımları arasında gerçek uygulamaya paralel olarak tünel eksenini yönünde 60 metre mesafe bırakılarak yapılmıştır. Şekil 9'da modelleme aşaması sırasında uygulanan kazı ve destek sistemi şematik olarak verilmektedir. Modelleme başlangıcında bu mesafeyi oluşturmak için sol tünelde ilk 40 m'lik kısımda üst yarı ve alt yarı bölümlerinde kazı ve desteklerin yapıldığı varsayılarak modelin bu bölümü boşaltılmış ve destek elemanları yerleştirilmiştir. Aynı şekilde sol tünel üst yarı bölümünde 40 ile 60 m'lerde de kazı ve destek işleminin yapıldığı ayrıca invert bölümünde de ilk 36 m'lik bölümün kazı ve invert betonun tamamlandığı varsayılmıştır. Ayrıca sol tünelde ilk 24 m'lik bölümde iç kaplamanın yapıldığı düşünülmektedir modelde uygulanmıştır. Böylelikle sol ve sağ tüneller arasında tünel eksenini yönünde istenilen 60 m'lik mesafe sağlanmıştır. İnşaat aşamasında üst yarı ile alt yarı arasında 20-30 m mesafe bırakılmaktadır. Invert

ile alt yarı arasındaki mesafe ise en fazla 4 m olmaktadır. Kazı işlemleri, her bir kademede üst yarıda 1 m, alt yarı da 2 m ve invertte 4 m olarak yapılmaktadır. Modelde kazı işlemleri tünelde yapılana uygun olarak sol tünelde üst yarıda 60. m den başlayarak 1'er m'lik kazılarla 60 ile 66. m'ye kadar 6 aşamada, alt yarıda ise 40 ile 46 m'ye kadar 2'şer m'lik kazılarla 3 aşamada, invert bölümünde ise 36 ile 44 m'ye kadar 4'er m'lik kazılarla 2 aşamada yapılmıştır. Ayrıca sol tünelde 0 ile 24 m'ler arasında iç kaplama betonu yapılmıştır (Şekil 9). Sol tünelde kazı ve tahkimat işlemleri bitirildikten sonra sağ tünelde kazı işlemlerine başlanmıştır. Üst yarıda ilk 8 m'lik bölümün kazısı 1'er m'lik kazılarla 8 aşamada, alt yarıda aynı şekilde ilk 8 m'lik bölümün kazısı 2'şer m'lik kazılarla 4 aşamada ve invert bölümünde ise ilk 8 m'lik bölümün kazısı 4'er m'lik kazılarla 2 aşamada bitirilmiştir (Şekil 10). Şekil 10 sağ tünelde kazı durumunun tamamlanmış halini göstermektedir.

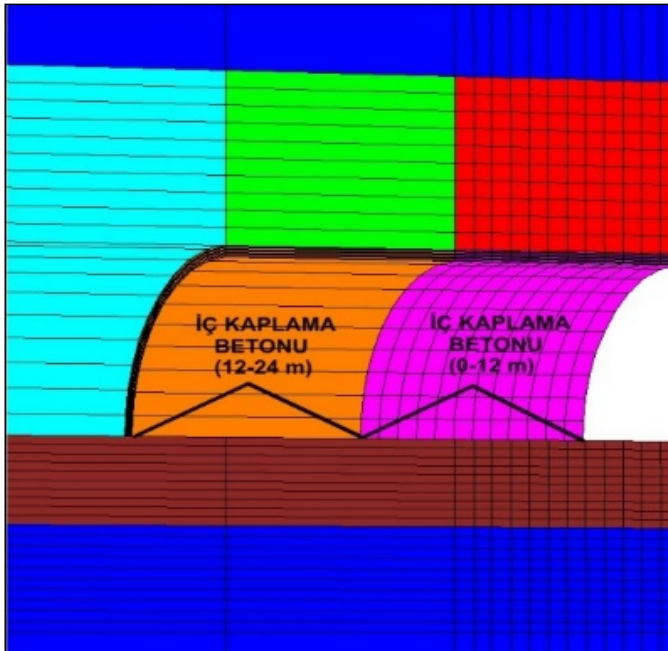


Şekil 9. Sol tünelde yapılan modelleme aşamaları

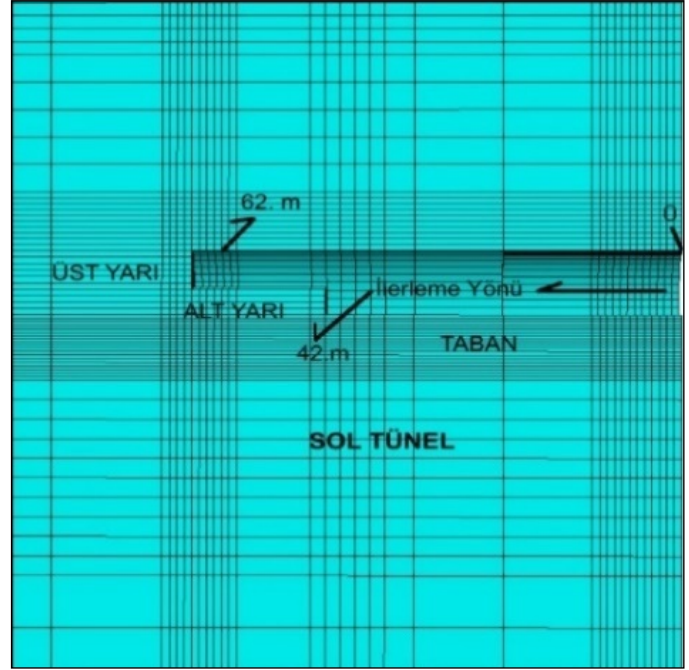


Şekil 10. Sağ tünelde modelleme aşamaları

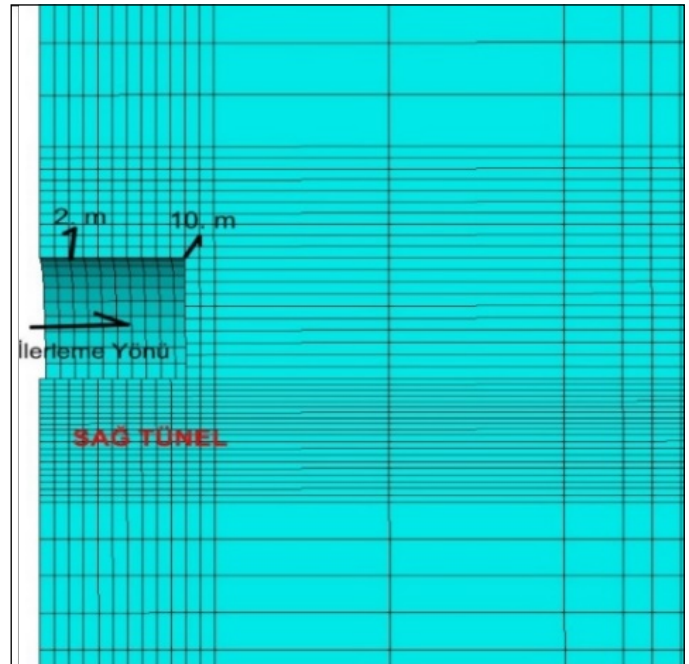
Statik analizlerde iç kaplamanın yapılmadığı durumu ayrıntılı bir şekilde inceleyebilmek için sağ tünelde iç kaplama betonu yapılmamıştır. Şekil 11'de sol tünel için modelde oluşturulan iç kaplama betonu gösterilmektedir. Model üzerinde meydana gelen değişimleri görebilmek ve zamana bağlı olarak yerdeğıştirmeler ile gerilmeleri izleyebilmek amacıyla referans noktaları seçilmiştir. Sol tünel üst yarı kazısı sırasında meydana gelen değışimler için 62 m, sol tünel alt yarıda meydana gelen değışimleri görebilmek amacıyla 42 m, sağ tünelde üst yarı tavan kısmında meydana gelen değışimleri görebilmek amacıyla 2 m seçilmiştir. Belirlenen bu noktalarda modelleme aşamalarına bağılı olarak yerdeğıştirme grafikleri çizdirilmiştir. Şekil 12'de model üzerinde belirlenen noktaların konumları verilmiştir.



Şekil 11. Modelde oluşturulan iç kaplama betonunun kesiti görünüşü



a) Sol tünel üzerinde belirlenen noktalar



b) Sağ tünel üzerinde belirlenen noktalar

Şekil 12. Model üzerinde yerdeğıştirme ve gerilmelerin incelenmesi belirlenen noktalar

Ayrıca tünelde meydana gelen yenilme durumları incelenmiştir. Flac3d programında yenilme durumları verilirken aşağıdaki kısaltmalar kullanılmaktadır (Itasca, 2002);

Shear-n: makaslama gerilmesine bağlı olarak yenilmenin olduğunu ve hala devam ettiğini göstermektedir.

Shear-p: makaslama gerilmesine bağlı olarak yenilmenin olduğunu ancak kuvvetlerin azalmasından dolayı yenilmenin durduğunu göstermektedir.

Tension-n: çekme gerilmesine bağlı olarak yenilmenin olduğunu ve hala devam ettiğini göstermektedir.

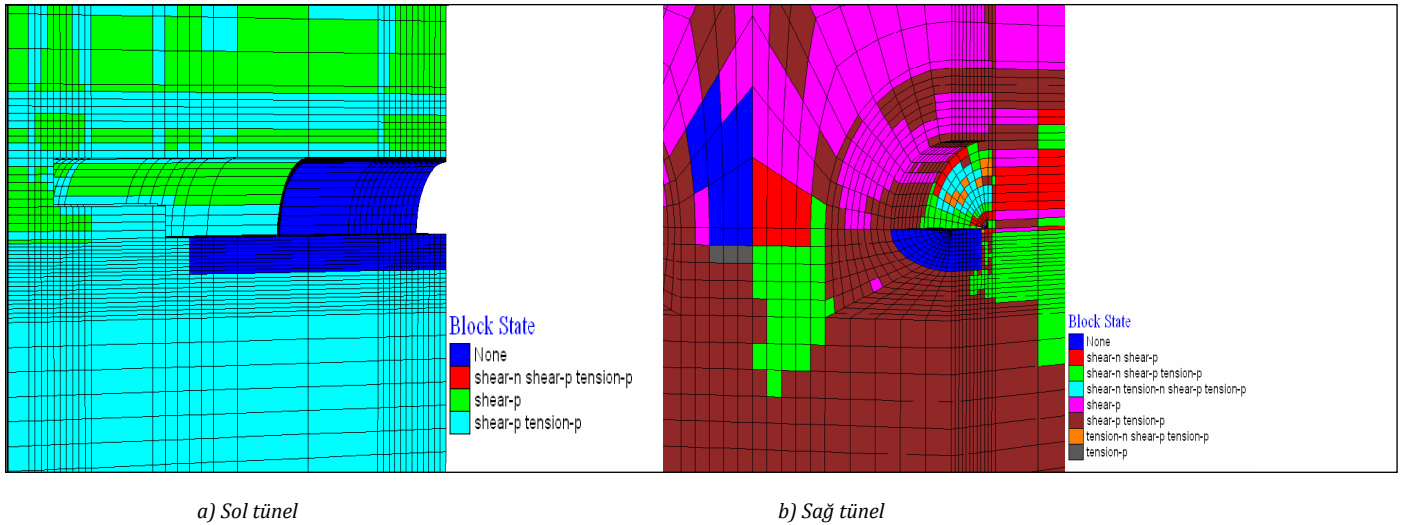
Tension-p: Çekme gerilmesine bağlı olarak yenilmenin olduğunu ancak kuvvetlerin azalması nedeniyle durduğunu göstermektedir.

N: Herhangi bir yenilmenin olmadığını göstermektedir.

Filiş serisinde açılan tünel için sağ tüneldeki kazı işlemi sırasında, ilk etapta üst yarıda ilk 10 m'lik bölümün kazısı yapılmış daha sonra alt yarı ve invert kazılarına başlanmıştır. Metakristalin bölümde ise, üst yarıda 2 m kazı, daha sonra alt yarıda 2 m kazı işlemi ile beraber tünel kazısı bir bütün olarak devam etmiştir. Böyle 2 farklı sistemin seçilmesindeki temel etken ring kapanma mesafesinin tüneller üzerinde etkisini görebilmektir.

3.1.1. Filiş Serisi İçin Yapılan Statik Çözümler

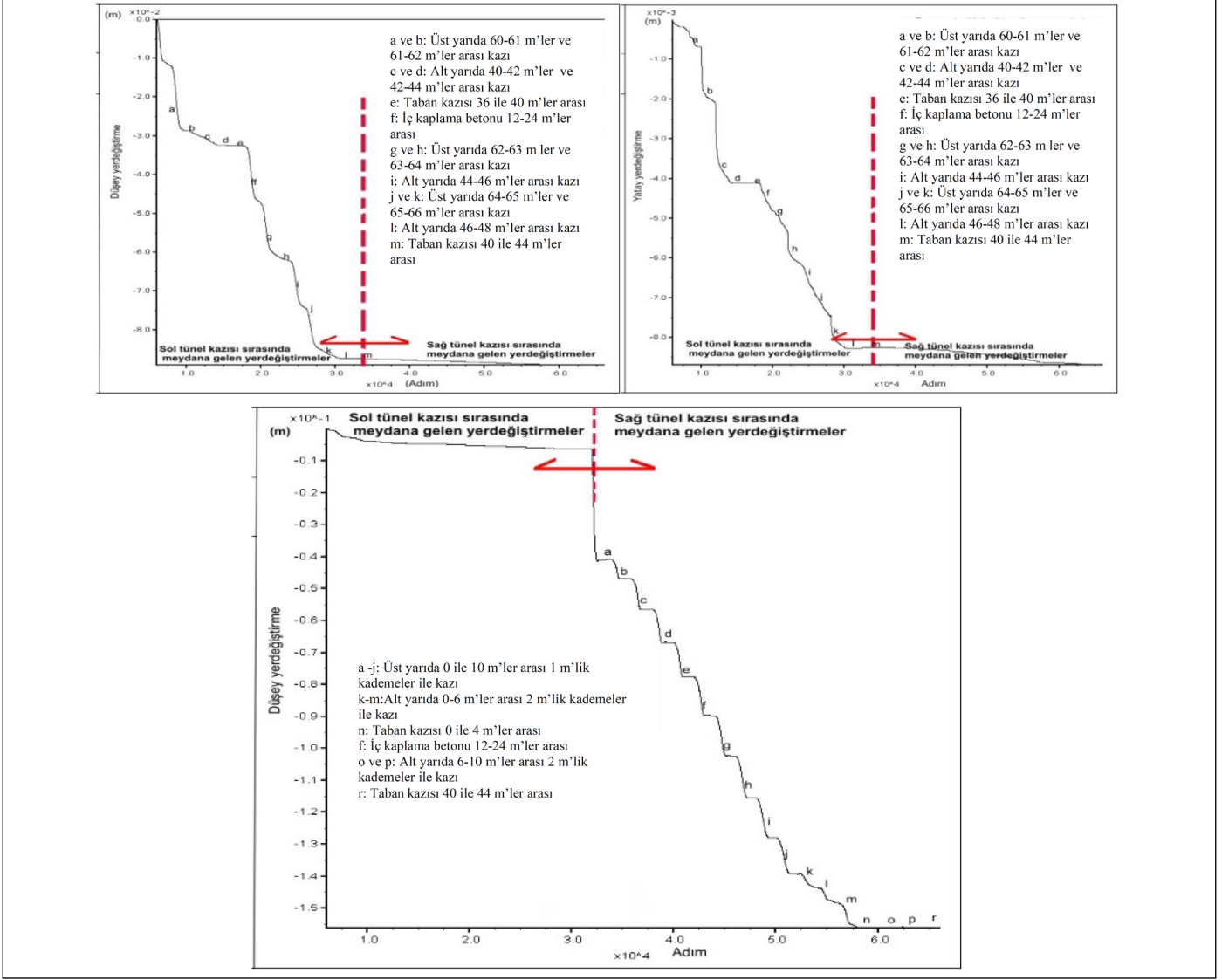
Tünellerde en son aşamada meydana gelen yenilme durumları ile yerdeğiştirme değişimleri incelenmiştir. Oluşturulan modellerde statik koşullarda meydana gelen yenilme durumları Şekil 13'te verilmektedir.



Şekil 13. Statik analiz sonucunda sol ve sağ tünelde meydana gelen yenilme durumu (kesit görünüşü)

Çizelge 3. Tünellerde meydana gelen yerdeğiştirme ve gerilmeler

Belirlenen noktalar	x yönü (mm)	y yönü (mm)	z yönü (mm)
Sol tünel 62 m tünel tavanı	1,84	12,2	-89
Sol tünel 42 m alt yarı	-8,63	-1,97	-18,5
Sağ tünel 2 m tünel tavanı	8,94	-7,01	-156



Şekil 14. Sol tünel üst yarı 62. m'de, alt yarı 42.m'de ve sağ tünel 2.m'de tünel kazı aşamalarına bağlı olarak meydana gelen düşey yerdeğiştirmeler

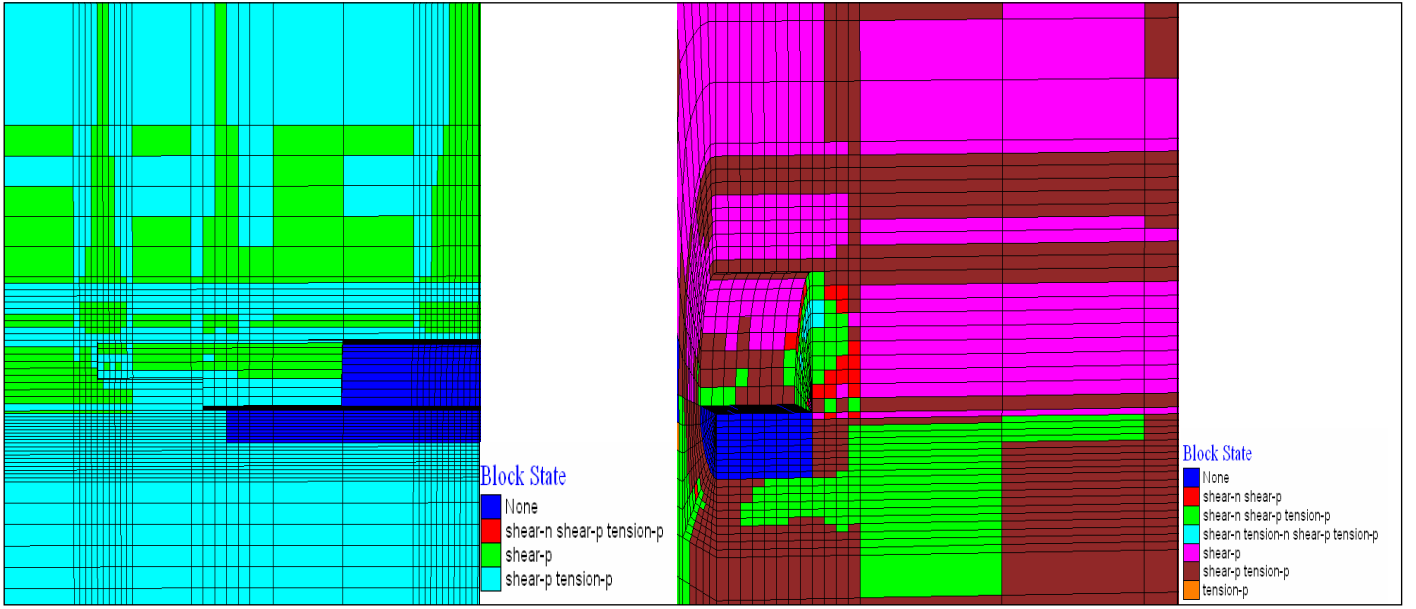
3.1.2. Metakristalin Tabaka İçin Yapılan Statik Analiz Çözümleri

Metakristalin tabakada analizler sonucunda meydana gelen yenilme durumları Şekil 15' te sunulmaktadır. Sol tüneldeki yenilme durumları incelendiğinde alt yarı bölümünde makaslama ve çekme gerilmelerine bağlı olarak yenilmelerin olduğu ve kuvvetlerin azalmasıyla durduğu gözlenmiştir. Üst yarı bölümünde ise etkin olarak makaslama kuvvetlerin etkisiyle yenilmelerin meydana geldiği ve zamanla gerilmelerin azalmasıyla durduğu gözlenmiştir. Sağ tüneldeki yenilme durumlarında ise alt yarı bölümünde makaslama kuvvetlerin etkisiyle yenilmelerin olduğu ve gerilmelerin azalmasıyla durduğu gözlenirken invert bölümüne yakın kısımlarında makaslama kuvvetlerin etkisiyle yenilmelerin devam ettiği görülmektedir. Üst yarı bölümünde ise etkin olarak makaslama kuvvetlerinin etkisiyle yenilmelerin meydana geldiği ve zamanla kuvvetlerin azalmasıyla durduğu gözlenmiştir. Şekil 16'da ve Çizelge 4'de tünellerde meydana gelen yerdeğiştirmeler ve gerilmeler sunulmaktadır. Meydana gelen yerdeğiştirmelerden de görülebileceği gibi, filiş serisine benzer şekilde sol tünelde kazı işleminin bitmesi ile beraber sağ tünel kazısına başlandığı dönem sırasında yerdeğiştirmelerde bir değişim gözlenmemiş ve sabit olarak devam etmiştir. Bir anlamda sağ tünel kazısının sol tünelde bir etkisinin olmadığını, sol tünel ile sağ tünel arasında bırakılan topuk ve ayna aralarındaki mesafelerin yeterli olduğunu göster-

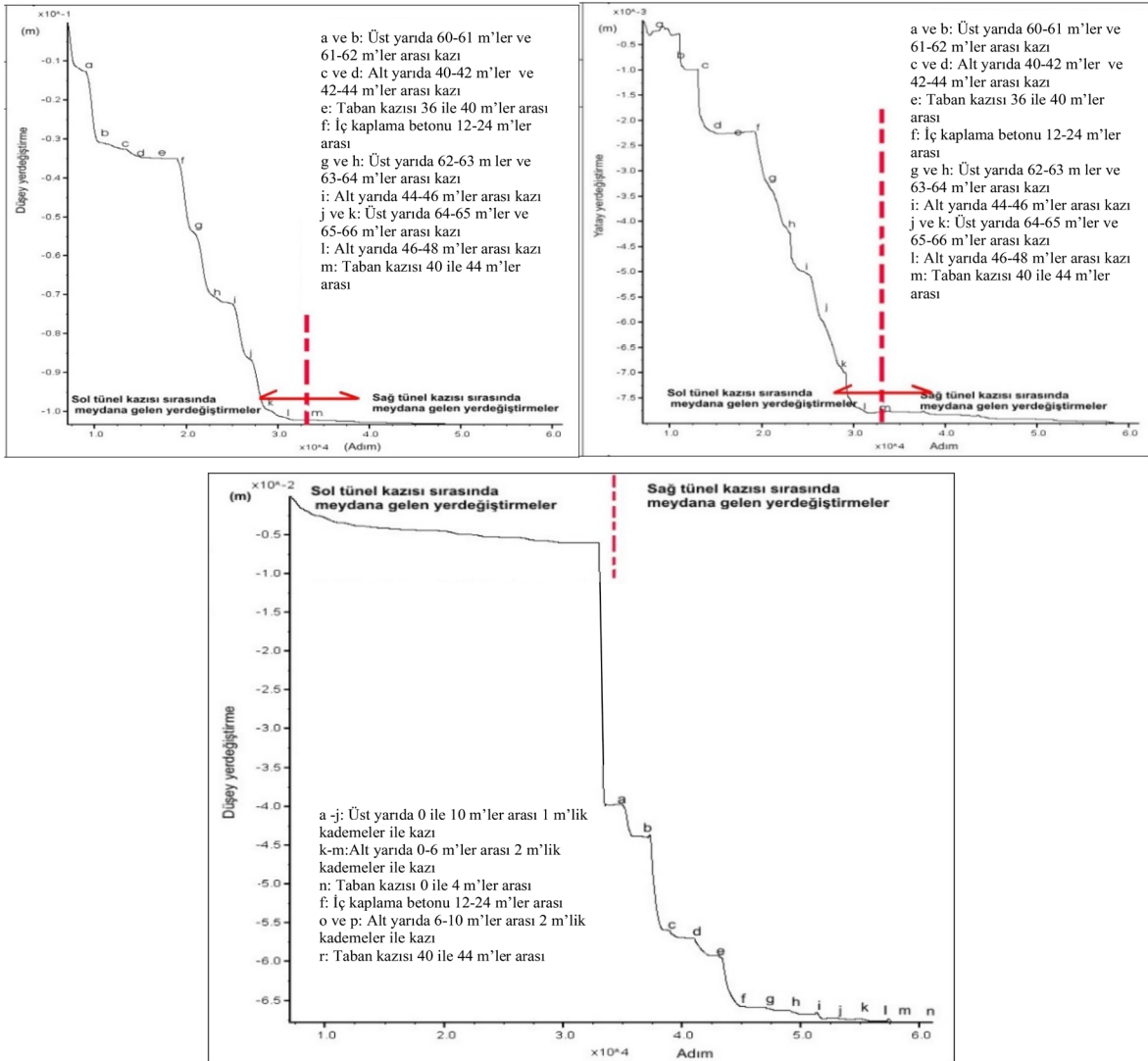
mektedir. Tünellerde meydana gelen değişimler sınır değerler içerisinde kalmıştır. Tünellerde yapılan kazı aşamaları ve destek sistemleri ile tünel duraylılığı sağlanmıştır. Ayrıca filiş ve metakristalin tabakalarda sağ tünel için yapılan farklı modelleme aşamaları incelendiğinde, üst yarıda kazı işleminin 10 m devam ederek daha sonra alt yarı ve invert kazılarının yapıldığı durumda tüneldeki yerdeğiştirmelerin daha hızlı olduğu gözlenmiştir. Metakristalin tabaka da ise; üst yarı, alt yarı ve invert kazılarının ardışık olarak yapılarak tünelin bir bütün olarak (tünel halkasının tamamlanması) destek görevini yapmasından dolayı yerdeğiştirmelerin daha yavaş düzeyde olduğu gözlenmiştir. Bu sonuç bize tünelin üst yarı, alt yarı ve invert kazılarının en kısa sürede bitirilmesi ve tünelin bir bütün olarak destek görevinin yapması tünel duraylılığı açısından önemini göstermektedir.

Çizelge 4. Tünellerde meydana gelen yerdeğiştirmeler

Belirlenen noktalar	x yönü (mm)	y yönü (mm)	z yönü (mm)
Sol tünel 62 m tünel tavanı	1,22	15,3	10,3
Sol tünel 42 m alt yarı	8,00	26,9	19,4
Sağ tünel 2 m tünel tavanı	3,38	44,7	67,8



Şekil 15. Statik analiz sonucunda sol ve sağ tünelde meydana gelen yenilme durumu



4. Sonuçlar

Analizlerde yerdeğiştirmeler sınır değerler içerisinde kalmaktadır. Tünel kazısının ardışık olarak yapılması tünel stabilitesi açısından önemlidir. Üst yarı, alt yarı ve invert mesafeleri mümkün olduğunca erken tamamlanmalı ve tünel destek sistemleri bir bütün olarak çalışmalıdır.

İki tünel arasında bırakılan topuk mesafesi ile üst yarı aynaları arasındaki bırakılan mesafeler yeterli geldiği görülmüştür.

Zayıf zeminlerde açılan iki tünelin birbirine olan etkisinin en aza indirilmesi en önemli faktörlerden birisidir.

Her bir kaya sınıfı için bu mesafeler zemine göre revize edilmelidir. Aksi takdirde tünellerin birbirine olan etkisi tünel destek sistemlerinin stabilitesi üzerinde olumsuz etki yapacaktır.

Zayıf zeminlerde açılan tünellerde iç kaplama betonu tünelde deformasyonların sönümlenmesinden hemen sonra yapılmalıdır. Aksi takdirde oluşacak olan şişme ve sıkışma basınçları uzun dönemde dış kaplamanın stabilitesini olumsuz etkileyecektir.

Zayıf zeminlerde yapılacak olan iç kaplama uzun dönemde oluşabilecek olan şişme ve sıkışma basınçları da karşılamak düzeyde olmalıdır. Bu bölgelerde iç kaplama donatılı olarak yapılmalıdır.

Kaynaklar

Aygar, E. B. 2000. Yeni Avusturya tünencilik yöntemine eleştirel bir yaklaşım. [master tezi]. [Ankara]: Hacettepe University

Aygar, E.B. 2007. Bolu Tüneli duraylılığının statik ve dinamik analiz yöntemleriyle incelenmesi. [doktora tezi]. [Ankara]: Hacettepe University.

Aygar, E.B. 2020. Evaluation of new austrian tunnelling method applied to bolu tunnel's weak rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 12 (2020) 541-556.

Aygar, E.B. 2021a. An evaluation on causes behind the bolu tunnel collapse following the 12 November 2 1999 düzce earthquake: seismic action or inadequate tunnel support capacity, in Reviewer.

Aygar, E.B. 2021b. An assessment on problems encountered during tunneling in graphitic schists, in Reviewer.

Aygar, E.B., Gokceoglu, C. 2020. 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>.

Aygar, E.B. Gokceoglu C. 2021a. Evaluation of collapsed zone in t24 tunnel (ankara-istanbul high speed railway project, turkey). *Euroengeo*. 3rd European Regional Conference of IAEG.

Aygar, E.B., Gokceoglu, C. 2021b. A special support design for a large-span tunnel crossing an active fault (t9 tunnel, ankara-sivas high-speed railway project, turkey). *Environmental Earth Sciences*, 80 (1), 37, <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09328-1>.

Aygar, E.B., Gokceoglu, C. 2021c. Analytical solutions and 3d numerical analyses of a shallow tunnel excavated in weak ground: a case from turkey. *International Journal of Geo-Engineering*. 12 (1), 9, DOI: 10.1186/s40703-021-00142-7.

Aygar, E.B., Gokceoglu, C. 2021d. Evaluation of collapse mechanism and portal interaction of a high-speed railway tunnel (t29 Tunnel, turkey). *Eurock* 2021.Torino.

Barla, G. 2002. Tunnelling mechanics tunnelling under squeezing rock conditions tunnelling mechanics - advances in geotechnical engi-

neering and tunnelling (pp.169-268) chapter: 3 publisher: P.O.Box 1675 Editors: D. Kolymbas.

Barla, G. 2016. Full-face excavation of large tunnels in difficult conditions. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, (2016) 294-303.

Dalgıç, S. 2002. Tunneling in squeezing rock, the bolu tunnel, anatolian motorway. turkey. *Engineering Geology*.

Geoconsult ZT GmbH. 1998. Bolu tunnel geological longitudinal profile along left tube as built conditions, asarsuyu portal to elmalık portal.

Geoconsult ZT GmbH. 2002. Anatolian motorway stretch-2 bolu tunnel by-pass rock support class distribuiton.

Goel, R.K., Jethwa, J.L., Paithakan, A.G. 1995. Tunnelling through the young Himalayas – a case history of the Maneri-Uttarkashi power tunnel. *Engrg. Geol.*, 39, pp. 31-44.

Hoek, E. 2001. Big tunnels in bad rock, The 36th Karl Terzaghi lecture. *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, A.S. C.E., 127(9), 726-740.

Hoek, E. 2007. *Practical Rock Engineering*, p 341, <https://www.rocs-science.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>.

Hoek, E. 2012. Rock Support Interaction analysis for tunnels in weak rock masses, <https://www.rocs-science.com/documents/pdfs/rocs-news/winter2012/Rock-Support-Interaction-Analysis-for-Tunnels-Hoek.pdf>.

Hoek, E., Marinos, P. 2000. Predicting tunnel squeezing. *Tunnels and Tunnelling International*. Part 1 – November 2000, Part 2.

Itasca, 2002. *Flac3d User Manual Getting Started*.

Jethwa, J. L. 1981. Evaluation of rock pressures in tunnels through squeezing ground in lower himalayas. PhD thesis. Department of Civil Engineering. University of Roorkee, India, 272.

KGM (General Directorate of Highways). 2013. Technical specifications of general directorate of highways.

Lettis, W. & Associates Inc., A.Barka, 2000. *Geologic Characterisation of Fault Rupture Hazard, Gümüşova-Gerede Motorway project report*.

Lunardi, P. 2000a. The underground as a resource and reserve for new spaces; adeco-rs as an effective tool to be able to realize them (part 1). *Proceedings of the Bindi R, Cassani G World Tunnel Congress 2014 – Tunnels for a better Life*. Foz do Iguaçu, Brazil.

Lunardi, P. 2000b. The underground as a resource and reserve for new spaces; adeco-rs as an effective tool to be able to realize them (part 2). *Proceedings of the Bindi R, Cassani G World Tunnel Congress 2014 – Tunnels for a better Life*. Foz do Iguaçu, Brazil.

Lunardi, P. 2008. Design and construction of tunnels, analysis of controlled deformation in rocks and soils (adeco-rs). 587 p.

Lunardi, P. 2014. The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils. *T&T International ADECO-RS Approach*, www.rocksoil.com.

Lunardi, P. 2016. Evolution of design and construction approaches in the field of tunnelling: the results of applying ADECO-RS when constructing large underground works in urban areas. *Procedia Engineering*, 165, 484 – 496.

Rabcewicz, L. 1964a. The new austrian tunnelling method, part one. *Water Power*. 453–7.

- Rabcewicz, L. 1964b. The new austrian tunnelling method, part two. Water Power 1964b; 511-5.
- Rabcewicz L. 1965. The new austrian tunnelling method, part three. Water Power 1965; 19-24.
- Rabcewicz, L, Golser J. 1973. Principles of dimensioning the supporting system for the "new austrian tunnelling method". Water Power, Marc, 88-93.
- Sakurai, S. 1983. Displacement measurements associated with the design of underground openings. Proc. Int. Symp. Field Measurements in Geomechanics, Zurich 2, 1163-1178.
- Schubert, W. 1996. Dealing with squeezing conditions in Alpine tunnels." Rock Mech. Rock Engng. 29(3), 145-153.
- Singh, B., J, L., Jethwa, A. R., Dube, B., Singh. 1992. Correlation between observed support pressure and rock massquality." Tunnelling and Underground Space Technology. 7(1).

