

Assessment of damage zone thickness and wall convergence for tunnels excavated in strain-softening rock masses –  
Gerilme Yumuşama Davranışı Gösteren Kaya Kütlelerinde Yapılan Yeraltı Kazıları İçin Kazı Hasar Bölgesi  
Kalınlığı ve Tünel Kapanımlarının Belirlenmesi”  
(Tunnelling and Underground Space Technology v108, (2021) issue 103722)

Yeraltı kazılarında sürekli üstesinden gelinmesi gereken iki temel problem vardır; güvenlik ve ekonomi. Yapılan kazı hem güvenli hem de ekonomik olmalıdır. Bu iki koşulun sürekli sağlanabilmesi için ise tünel kazısı sonrası kazı duvarlarının tünel içine doğru olan kapanımları, “deformasyonlar” ve kazı sonrasında kaya kütlesi gerisinde oluşan kazı hasar bölgesi derinliği doğru ve zamanında tespit edilmelidir. Kazı hasar bölgesi kalınlığı doğru tespit edilebilirse, destek sistemi tasarımı ve derinlikleri de doğru belirlenebilir. Bu şekilde tünel içi deformasyonlar istenilen seviyede tutularak hem kazı güvenliği sağlanmış olur hem de tünel kazısı daha hızlı ve ekonomik bir şekilde tamamlanmış olur. Ayrıca, kazı hasar bölgesi ve deformasyonlara ilişkin tahminler sürekli izlenmelidir ki olası hesap hataları ve beklenmeyen koşullar tünel tasarımcısı tarafından önceden görülebiliş önlem alınabilsin. Ancak, uygulamada kazı sonrası tünel duvarı arkasında oluşan hasar bölgesi kalınlığı ile deformasyon miktarlarının tahmini, yerinde gerilme ölçümleri ve deformasyon okumaları titizlikle yapılmadığı ve doğru yöntemler zamanında kullanılmadığı sürece doğru sonuçların elde edilmesi güçtür. Ayrıca bu gibi ölçüm yöntemlerinin yerinde kullanılması hem pahalı hem de kazı hızını yavaşlatabilecek nitelikte olduğu için çoğu zaman kullanımları tercih edilmemektedir. Bu nedenle, bu çalışmada at-nalı şekilli karayolu tünelleri için ampirik yöntemler kullanarak kazı hasar bölgesi kalınlığı ile deformasyonlar arasındaki ilişkiyi ortaya koyabilecek matematiksel bir yöntem belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun için daha önce kazısı tamamlanmış tünellere ilişkin verilere 2 boyutlu düzlemsel-gerilme (plane-strain) yaklaşımı sonlu elemanlar nümerik modeli kullanılarak uygulanmıştır. Deformasyon okumalarının hassas yapıldığı ve yenilme sonrası gerilme-yumuşama (orta-zayıf kalite) kaya davranışı gösteren 5 tünelden toplam 9 adet tünel kesiti ampirik analizler için seçilmiştir. Tünel güzergahının mühendislik özellikleri jeolojik haritalar, sondaj verileri ve laboratuvar çalışmaları yardımı ile belirlenmiştir. Tünel deformasyon okumaları tünel içi optik ölçüm cihazları yardımı ile 3 boyutlu uzayda yapılmıştır. Sahadan toplanan ve istatistiksel yöntemlerle tahmin edilen deformasyon verileri ile kazı yapılan kaya kütlelerine ait jeoteknik parametreler kullanılarak ampirik analizler tamamlanmıştır. Daha sonra analiz için seçilen her bir tünel kesiti için nümerik modeller oluşturulmuş ve çalışılmıştır. Kazı hasar bölgesi kalınlığının belirlenebilmesi için nümerik analizlerden elde edilen; yenilen elemanlar (yielded elements), hacimsel gerilme (volumetric strain) ve asal gerilme yoğunluklarına (principal stress concentrations) ilişkin grafikler ve verilen kullanılmıştır. Bu şekilde nümerik model verileri yardımı ile belirlenen kazı hasar bölgesi kalınlığı ve deformasyonlar, gerçek deformasyon verileri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar önceki araştırmacıların ortaya koyduğu deformasyon kalınlığı ve plastik zon kalınlığına ilişkin ampirik modellerle de karşılaştırılmış ve sonuçlar uygunluk açısından yorumlanmıştır. Karşılaştırma sonucunda elde edilen bulgular, bu çalışmada ortaya konulan yöntemin hem saha verileri ile hem de önceki çalışmalarda önerilen ampirik yaklaşımlarla uyumlu olduğunu göstermektedir. Çalışmada kazı hasar bölgesi önceki araştırmacılarla da uyumlu olacak şekilde 3 alt bölge şeklinde değerlendirilmiş ve her üç bölge için farklı kalınlıklar ortaya konmaya çalışılmıştır. Buna göre “HDZ” olarak tanımlanan ilk bölge yüksek deformasyon zonu, “EDZ” olarak tanımlanan ikinci bölge kazı deformasyon zonu olarak tanımlanmıştır. En dıştaki bölge ise destek tasarımı için önem arz etmeyen, sadece kaya kütle özelliklerinde tünel kazı stabilitesi açısından önemsiz etkileri olan “EIZ” kazı etki zonu olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada önerilen yöntemde göre; nümerik modelde yer alan elemanlarda (yielded elements) yenilmenin ilk başladığı bölge ile asal gerilme  $\sigma_3$  ün artmaya başladığı bölge arası HDZ, asal gerilmenin yükselmeye başladığı bölge ile nümerik model elemanlarında (yielded elements) yenilmenin sifıra düştüğü bölge arası EDZ ve daha sonrası da EIZ olarak kabul edilmiştir. Bu zonlar güvenli tarafta kalabilmek adına nümerik modelde yenilmelerin pik yaptığı kesimler için kazı duvarından dışarı doğru ölçülmüştür ve doğada birbiri ile geçişli olabilecek durumdadır. Ancak, analiz sonuçları HDZ için elde edilen kalınlıkların daha güvenilir aralıklarda olduğunu ve uygulamada da kullanılabilirliğini göstermiştir. Elde edilen bu sonuçlar ışığında önceki tünel deformasyon verilerinden yola çıkarak benzer örtü kalınlığı, benzer topoğrafik yapı ve benzer jeolojik-jeoteknik özelliklerdeki kaya kütleleri için deformasyon tahmini yapmaya yönelik matematiksel bir model ortaya konmuş ve bu modelin doğruluğu nümerik analizlerle ve önceki çalışmalarla karşılaştırılmış ve istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar elde edilmiştir. Bu yaklaşıma göre; tünel

içinde deformasyon okuması yapılan noktalardan elde edilen bileşke vektörlerin o noktadaki et kalınlığına oranlarının tek tek toplamlarının ortalaması sürekli olarak “deformasyon sabiti” – “convergence constant” adı verilen sabit bir değere yakınsamaktadır. Dolayısı ile elde edilen sabit tünel kazısının ilerleyen kesimlerinde; benzer jeolojik yapı, benzer topoğrafya özellikleri mevcutsa, oluşabilecek deformasyonların tahmini için kullanılabilir. Elbette bu çalışmanın bulguları saha ölçümleri destekleyici nitelikte düşünölmeli ve saha ölçümü yapmanın mümkün olmadığı kesimler için yardımcı araçlar olarak kullanılmalı ve mutlaka doğrulukları saha ölçümleri ile zaman zaman sorgulanmalıdır.

Dr. Özgür SATICI