



## Konvansiyonel Kazı Yöntemleriyle Açılan Demiryolu Tünel Projeleri Yapım ve İşletme Süreçleri için Risk Esaslı Uygulama Modeli Önerisi

Özgür SATICI<sup>id</sup>

Karayolları Genel Müdürlüğü, İç Denetim Birimi Başkanlığı, Ankara, Türkiye

osatici@gmail.com

(Alınış/Received: 01.11.2023, Kabul/Accepted: 09.12.2023, Yayımlama/Published: 31.01.2024)

**Öz:** Tüm mühendislik projeleri aynı zamanda bir risk yönetim uygulamasıdır. Bu nedenle mühendisler projeleri tasarlarken ve yönetirken bilinçli ya da bilinçsiz şekilde proje risklerini de yönetmek zorundadır. Beklenmeyen durumlarla karşılaşılacak mühendislik projelerinden biri de yeraltı mühendislik yapılarından biri olan tünel projeleridir. Bu çalışma yaygın bilinen tünel yapım teknikleri ile risk yönetim prensiplerini bir araya getirecek bir bakış açısı ortaya koymakta ve bir tünel projesinin uygulanması sırasında ortaya çıkabilecek olası sorunlara karşı önceden önlem alınmasına yardımcı olacak bir yöntem önermektedir. Bu çalışmanın amacı özellikle yeraltı mühendislik projelerinde risk yönetim ilke ve tekniklerinin kullanımı ile ilgili bir farkındalık yaratmaktır. Bu bağlamda tünel mühendislik tasarım ve kazı aşamaları senaryo yapılandırma modeli yöntemi ile değerlendirilmiş ve tünel projesinin tasarımdan yapım aşamasına kadar olan süreçlerde risk oluşturabilecek önemli belirsizlikler tanımlanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Risk değerlendirme, Risk yönetimi, Senaryo yapılandırma modeli, Tünel projelendirilmesi, Yeraltı kazı yöntemleri

### Risk Assessment Based Application Model for Design, Construction and Operational Stages for Conventionally Excavated Railway Tunnels

**Abstract:** Every engineering project inherently involves applications of risk management. For this reason engineers have to manage the risks consciously or unconsciously. Underground excavations are the projects that unexpected situations may occur mostly. This study combines common tunnel construction techniques and risk management principles and proposes a method that will help to take precautions against possible problems that may arise during the implementation of a tunnel project. In this context, tunnel engineering design and excavation phases were evaluated with the scenario structuring model and important uncertainties that could pose risks in the processes from the design to the construction phase of the tunnel project were defined. The aim of this study is to raise awareness about the use of risk management principles and techniques, especially in underground engineering projects.

**Keywords:** Risk assessment; Risk management; Scenario structuring model; Tunnel project; Underground excavation methods.

## 1. Giriş

Yeraltı kazılarında temel felsefe; önce kazı yapılması sonra desteklenmesi veya destekler uygulandıktan sonra kazının yapılması şeklindedir. Bu temel felsefe çerçevesinde çeşitli tünel açma yöntemleri geliştirilmiştir [1], [2]. Ancak bu yöntemlerin hiçbiri bir tünel projesinin risklerini tünelciliğin temel ilke ve prensipleri ile birlikte değerlendirmemiştir. Bazı araştırmalarda kazıdaki jeoteknik risklere odaklanılmış, bazıları sağlık ve güvenlik riskleri üstünde durmuş, birtakım araştırmalarda da sıkışan zemin koşullarındaki Tünel Delme Makinesi (yaygın bilinen adı: TBM - Tunnel Boring Machine) kazı risklerini incelenmiştir [3-19]. Bir tünel projesinde karşılaşılacak riskler teknik (mühendislik tabanlı) ve teknik olmayan olarak iki grupta değerlendirilebilir. Tünel kazı ekibinin, yüklenicinin tecrübesi, sözleşme koşulları, ihale bedeli, iklim koşulları, küresel salgın vb. faktörler teknik olmayan risk faktörleri içinde

Atıf için/Cite as: Ö. Satıcı, "Konvansiyonel kazı yöntemleriyle açılan demiryolu tünel proje, yapım ve işletme süreçleri için risk esaslı uygulama modeli önerisi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 147-159, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1384548

değerlendirilebilir. Tünel kazı deformasyonları, plastik zon kalınlığının gelişimi, jeolojik koşullar, bölgesel tektonizma gibi etkenler ise teknik risk faktörleri olarak değerlendirilebilir. Bu risk faktörleri; tünel kazı güvenliği, tünel duraylılığı ve dolayısı ile maliyet ve projenin öngörülen tamamlanma takvimi üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Bu çalışmanın amacı bir tünel projesinin sahadaki jeolojik-jeoteknik etütler ile mühendislik jeolojisi modelleme çalışmalarından başlayarak, kazı destek aşamaları ve sonrasında ikincil işler olarak tabir edilen aydınlatma ve havalandırma projeleri ile işletme dönemi projelerini de kapsayacak şekilde belirsizlikleri ve projenin risklerini ortaya koyabilmek, bunların sistematik bir şekilde sınıflamasını yapabilmek ve bu konuda bir farkındalık oluşturabilmektir.

## 2. Metot

Bu çalışmada risk yönetim esaslı tünel proje tasarım ve yapım yöntemi önerilmiş, bir tünel projesini etkileyebilecek olası riskler ve etkileri incelenmiştir. Çalışmada öncelikle klasik kazı ve destekleme için bilinen tünel tasarım ve yapım yöntemleri anlatılmış, daha sonra risk yönetimi ile ilgili temel kavramlar verilmiş ve tünel yapımında risklerin değerlendirilmesi ile ilgili önceki çalışmalar aktarılmıştır. Daha sonra tünel proje adımları risk yönetimi bakış açısı ve temel mühendislik ilkeleri ışığında incelenmiştir. Senaryo Yapılandırma Modeli yaklaşımı kullanılarak bir tünel projesine ilişkin riskler, tasarım aşamasından yapım aşamasına kadar belirlenmiş ve sınıflandırılmıştır. Daha sonra belirlenen riskler olası senaryolar ışığında yorumlanarak risk yönetimine dayalı tünel proje ve yapım yöntemi önerilmiştir.

## 3. Yaygın Bilinen Klasik Tünel Açma Yöntemleri

Günümüzde tünel yapım yöntemlerinin büyük bir kısmı aşamalı kazı ya da tam ayna kazısının çeşitli türevleri şeklindedir [1], [2], [20], [21]. Bu yöntemlerin dezavantajı tünel kazı derinliği, kaya kütlelerinin jeolojik özelliklerinden (mineralojik, petrografik, jeomekanik) kaynaklanan hassasiyetleri, kazı alanının boyutlarını ve kazı sonrası kaya davranışlarını dikkate almıyor olmalarıdır. Ayrıca bu yöntemler, kullanılacak desteğin tipi, dizilimi, boyutları ve en önemlisi bunların uygulanması sırasında ortaya çıkabilecek belirsizliklerle ilgili bir değerlendirme ve öneride bulunmamaktadır [1-4], [6], [14], [16], [21-30]. Tasarım aşamasında dikkate alınmayan bir takım hata ve eksikliklerden kaynaklanan belirsizlikler (jeolojik ve jeoteknik belirsizlikler) yapım aşaması riskleri olarak ortaya çıkacaktır. Bu durumun üstesinden gelebilmek için kaya kütlelerinin jeolojik ve jeoteknik özellikleri tam olarak bilinmeli ve buna uygun olarak destekleme tasarımı yapılmalıdır. Aksi takdirde kazı duraylılığını sağlamakta sorunlar yaşanacaktır. Ancak günümüz yöntemleri kaya kütle davranışlarını nesnel ve niceliksel olarak tanımlamakta yeterli değildir [1], [2], [25], [26], [28], [29]. NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi) ve ADECO R.-S. (Analysis of Controlled Deformation in Rocks and Soils, Kaya ve Zeminlerde Kontrollü Deformasyon Analizi) yöntemleri çeşitli kaya sınıflama sistemlerine (Q; Engineering Classification of Rock Masses [22], RMR; Rock Mass Rating system [23], RMi; Rock Mass Index [29], RQD; Rock Quality Designation [30], GSI; Geological Strength Index [31], M-RMR; Modified RMR [32], RSR; Rock Structure Rating [33], Rock Load [34]) ve bu sistemler tarafından önerilen ampirik denklem ve grafikler esasına dayanmaktadır [8], [22], [23]. Kaya sınıflama sistemleri de bir takım öznel değerlendirme kriterleri içermekte ve bu öznel nedeni ile uygulama aşamasında risk oluşturabilecek birtakım belirsizlikleri bünyesinde barındırmaktadır [10]. NATM temelinde aşamalı kazı önerilmekte, zeminler duraylı, gevrek ve sıkışan şeklinde tanımlanmaktadır [35]. Bu yöntem basınç altında kazı sonrası kaya kütle davranışlarını gözleme ve bu bağlamda kazı performansını değerlendirme esasına dayanır. Bu nedenle de uygulaması sırasında kaya kütle sınıflama sistemleri ve onların ampirik yaklaşımlarını da kullanmaya ihtiyaç duyar [25], [27]. Ancak NATM'nin kazı sonrası kaya davranışını izleme ve değerlendirme kriterleri oldukça öznel ve kullanılan yöntem, kazı ekibi, hızı, jeolojik – jeoteknik belirsizlikler, makine, ekipman, patlatma hataları gibi konulardan kaynaklanacak belirsizlikleri ve bunların sonucu ortaya çıkacak risklerin projeye olumsuz etkilerini dikkate

almaz. Tünel yapımında kullanılan diğer bir yöntem ise ADECO adı verilen deformasyonların kontrollü analizi yaklaşımıdır. Bu yaklaşım NATM'nin aşamalı kazı önerisinin aksine tam ayna kazı yöntemini savunur. Bu yöntem kaya kütle yapısı nasıl olursa olsun kazı aynasının tam kesit desteklenmesi gerektiğini savunur [2], [26], [28]. Ancak, tıpkı NATM de olduğu gibi ADECO yaklaşımı da öznel ve kullanılan yöntemden, kullanıcılardan ve kaya kütle davranışından kaynaklanabilecek belirsizlikleri değerlendirmez. Kazı sonrası kaya davranışını değerlendirirken nesnel değerlendirme yöntemleri kullanmaz. Tünel yapımı için kullanılan yöntemler kazının ve kaya kütle davranışının gözlemsel değerlendirmesine dayanmaktadır. Bu da yapılan değerlendirmenin öznel ve niteliksel olması anlamına gelir. Oysa ki, böyle büyük inşaat projelerinde niceliksel ve nesnel değerlendirme birtakım belirsizlikleri de beraberinde getirecektir [4], [10]. Zira yeraltı kazıları ve tünel projeleri özgün çalışmalardır ve jeolojik birimler aynı olsa dahi iki farklı lokasyondaki kaya kütle davranışları aynı olmayacaktır. Bu nedenle tünel kazı çalışmalarına başlamadan önce detaylı mühendislik jeolojisi modeli oluşturulmalı, kazısı yapılacak birimlerin jeoteknik özellikleri tanımlanmalı ve yorumlanmalıdır. Ancak, zaman zaman çeşitli nedenlerle, ki bunlar çoğu zaman maliyet ve zaman kaynaklı olurlar, kazı alanının jeolojik ve jeoteknik özellikleri istenilen ölçüde tanımlanamayabilir. Saha araştırmaları ile tam olarak aydınlatılamayan jeolojik koşullarla ilgili olarak yapım aşamasında gelişebilecek problemleri öngörebilmek için ise risk esaslı değerlendirme yöntemlerinin kullanılması önerilmektedir [3], [5-7], [9], [13], [16-19].

### 3. Tünel Projelerinde Risk Değerlendirme ile İlgili Önceki Çalışmalar

Eskenes vd. [6] çalışmasında tünelcilikte risk yönetim prosedürlerine ilişkin bir rehber önerisi sunulmuştur. Bu rehber göre tünel projesine ilişkin risk yönetimi ön tasarım, teklif-sözleşme ve inşaat aşamaları olmak üzere 3 aşamada incelenmiş, bir kısmı niteliksel bir kısmı niceliksel olmak üzere genel risk yönetim süreçleri ve karar destek araçları verilmiş fakat tünel proje ve kazı aşamaları için olası risk kategorileri tanımlanmamıştır. Haines [36] yeraltı yapılarına ilişkin riskleri kırılganlık ve esneklik yönünden teorik olarak incelemiştir. Schubert [11], Poeschl ve Kleberger [10] tünel ve jeoteknik çalışmalarda risk yönetim kavramını çalışmışlardır. Bu çalışmalarda risk kavramı jeolojik faktörler ve tünel duraylılığı yönünden incelenmiştir. Risk değerlendirmesi için simetrik risk matrisi kullanılmış ancak projeye ilişkin bütçe, kalite ve zaman bileşenleri risk unsuru olarak değerlendirilmemiştir. Brown [3] yeraltı kazılarında risk değerlendirme ile ilgili en kapsamlı çalışmalardan biridir. Bu çalışmada çeşitli risk analiz ve değerlendirme teknikleri tanımlanmış ve yeraltı yapıları için risk analizine ilişkin bir değerlendirme önerisi sunulmuştur. Bu çalışmada jeoteknik risklerin tanımlanması ve değerlendirmesi için olasılıksal bir değerlendirme aracı sunulmuştur. Olası risk tanımlamaları ve bunların tünel açma projesine potansiyel etkileri bu çalışmada yer almamaktadır. Sousa vd. [15] kaya patlamasına ilişkin risk değerlendirmesi için veri madenciliği tekniğini kullanmışlardır. Bu amaçla Bayes ağı kullanılarak çeşitli mühendislik parametreleri, jeolojik yapı ve kaya patlamalarına ilişkin veri tabanı bilgileri değerlendirilmiştir. Gutierrez-Fernandez [8] yeraltı yapılarında bazı yaygın kullanılan kaya kütle sınıflandırma sistemlerini (RMR, GSI, Q ve RMI gibi) kalitatif ve kantitatif risk analiz yöntemleri kullanarak analiz etmişlerdir. İnşaat ve kaya mühendisliği uygulamaları açısından bazı jeoteknik risk faktörleri, olasılıkları değerlendirilmiş ve jeolojik olaylardan kaynaklanacak sorunlar ve bunlara bağlı maliyet artışlarına da değinilmiştir. Fakat risklerin azaltılmasına ilişkin bir strateji ve öneri verilmemiş, daha ziyade kaya mekaniği ve jeoteknik uygulamalarda risk değerlendirmenin önemi vurgulanmıştır. Tidlund et al. [17] İzlanda da yürütülen bir tünel projesi için gözlemsel olarak risk yönetim çalışması uygulamıştır. Bu çalışmada da risk analizleri gözlemsel hasar göstergeleri adı verilen ve daha çok jeoteknik risklere karşı önceden önlem almayı sağlayan bir değerlendirme kullanılmıştır. Jeoteknik çalışmalarda, kaya mekaniği ve tünelcilik uygulamalarında bazı risk değerlendirme yöntemleri kullanılmış olmasına karşın bir tünel projesinin bütüncül olarak risklerinin değerlendirmesine ilişkin kapsamlı bir çalışma bugüne kadar uygulamada yer almamıştır. Özellikle bilinen tünel açma yöntemleri ile jeoteknik ve kaya mühendisliği prensiplerinin risk

esaslı değerlendirilmesi ile ortaya konacak yöntem söz konusu mühendislik uygulamalarının daha güvenli ve ekonomik olarak yapılmasına imkan sağlayacaktır.

#### 4. Risk Yönetimine İlişkin Bazı Temel Kavramlar

Risk ve belirsizlik kavramları risk yönetimi hakkında bilinmesi gereken iki temel kavramdır. Risk en basit haliyle hedeflere etkisi olan belirsizliklerdir, dolayısı ile olasılık içerir. Belirsizlik ise süreç, devamlılık, olay vb. yönlerden belirsiz olma durumudur. Eğer bir durum belirsizlik içeriyorsa, belirsizliğe neden olan olasılıklar durumla ilişkili bilgi eksikliği nedeni ile tanımlanamıyor demektir [37]. Haimes [38] belirsizliği; bir durumu belirsiz yapan ölçülemeyen veya belirlenemeyen olasılıklar şeklinde tanımlamıştır. Risk yönetimi çeşitli kontroller kullanarak riskin olumsuz etkisini azaltmaya çalışır [39]. Bu bağlamda riske karşı kontroller arttıkça riskin tehdit etkisi azalacak, ya da fırsatın ortaya çıkma olasılığı artacaktır [36], [40], [41].

#### 5. Bir Demiryolu Tünel Projesi İçin Risk Oluşturabilecek Koşullu Bağlantıların Belirlenmesi

Yeraltı yapıları ve kazıları çok sayıda belirsizlik içerdiğinden bir tünel kazısı projesinde başarı için çok sayıda belirsizliğin tespit edilmesi ve bunların üstesinden gelinmesi zorunludur [4], [6], [10], [42]. Bu nedenle zemin koşulları, kazı derinliği, sözleşme şartları ve tünel kazı ekibinin ve davranışlarının değişkenlik gösterdiği ve dolayısı ile belirsizlik içerdiği her tünel inşaatı projesi için aynı kazı yöntemini uygulamak ne ekonomik ne de güvenli olacaktır [11]. Dolayısı ile, yürütülen tünel projesine özgü riskler belirlenmeli ve risk yönetim ilke ve prensipleri çerçevesinde mühendislik uygulamaları ile birlikte yönetilmelidir [4], [12], [43]. Tünel projesi ile ilgili belirsizlikler çoğunlukla mühendislik tasarım parametrelerini etkileyecek teknik ve teknik olmayan iki grup faktörle alakalıdır [4], [6], [10], [11]. Bir tünel projesi için 4 temel aşama tanımlanabilir; saha araştırmaları ve tasarım çalışmaları, kazı ve hafriyat çalışmaları, destekleme ve kaplama çalışmaları ile ikincil işler adı verilen işletme dönemine yönelik çalışmalar. Bu aşamaların her biri risk barındıran belirsizlikler içerir ve her aşama sonrakinin başarısını etkileyecektir [4], [6], [11]. Topoğrafik haritalar ve mühendislik jeolojisi haritaları, jeolojik boy profiller ve enine kesitler, jeoloji, jeolojik birimlerin mühendislik özellikleri, jeoteknik saha araştırmaları ve laboratuvar çalışmaları tünel tasarım projesinin temel girdileridir. Bu girdiler ve diğer teknik olmayan değişkenler istatistik bilimi bakış açısı ile projenin bağımsız değişkenleri olarak sınıflandırılabilirler [24], [44], [45]. Bu nedenle istatistiksel modeller belirsizlikleri anlamak ve projenin risklerini analiz etmek için tünel mühendisliği ilke ve prensipleri ile birlikte kullanılmalıdır. İstatistiksel modellemede deneyim, bilgi birikimi ve veri analitiği süreçleri önemlidir, ancak risk modellerini kurabilmek için başka bilinmeyenlere de ihtiyaç olacaktır [3]. Bu sebeple tünel mühendisliğinde risk analizleri için istatistiksel modeller kurulurken tünel projelendirme sistemini ve çevresi ile olabilecek tüm etkileşimleri dikkate almak gereklidir. Esasen bu durum çeşitli olasılıksal koşullar altında bulunan tüm durumsal modeller için genel bir önkoşuldur [38]. Bu nedenle bu çalışmada ilk defa Kaplan ve Garrick [39] tarafından ortaya konulmuş olan Senaryo Yapılandırma Modeli (SYM, Scenario Structuring Model) kullanılmıştır. SYM de risklerin değerlendirilmesi için matematiksel model oluşturmak üzere bir dizi değişken kullanılmıştır [36], [38], [39]. Bir tünel inşaat projesinde SYM için seçilen değişkenler ve onların koşullu bağlantıları Şekil 1.'de verilmiştir. Şeklin sol bölümü bağımlı değişkendeki duruma neden olan “sebebe” faktörü yani bağımsız değişkenlerin kategorizasyonlarını, sağ taraf ise söz konusu sebebe faktörü nedeniyle tetiklenebilecek ve bağımlı değişkende bir değişime sebebe olacak “etki”yi açıklamaktadır. Bu çalışmada, 4 bağımlı (etkilenen) ve 4 de bağımsız (etkileyen) değişken grubu tanımlanmıştır. Etkileyen grup “olası sebebe” grubu, etkilenen grup ise “sonuç” grubunu ifade etmektedir. Çalışmada kullanılan sebebe değişkenleri grubu (bağımsız değişkenler); durumsal değişkenler (DuD), karar değişkenleri (KD), dışsal değişkenler (DıD) ve rassal değişkenlerdir (RD). Ana bağımlı değişken olan tünel yapım projesine bağılı sonuç değişkenleri (bağımlı değişkenler) ise; saha çalışmaları (SÇ), tasarım çalışmaları (TÇ), kazı destek işleri

(KDİ), işletme dönemi proje ve çalışmaları olarak sınıflandırılmıştır (İDÇ). Çalışmada bağımlı ve bağımsız değişkenlerin alt grupları ilişkili değişkene indis değeri verilerek gösterilmiştir. Bağımsız değişkenlere ilişkin açıklamalar burada verilmiştir. Bağımlı değişken grubu ise bir tünel inşaatı projesinin tüm teknik detaylarını oluşturduğundan detayları bu çalışmada sunulmamış sadece isim olarak verilmiştir (Şekil 1).

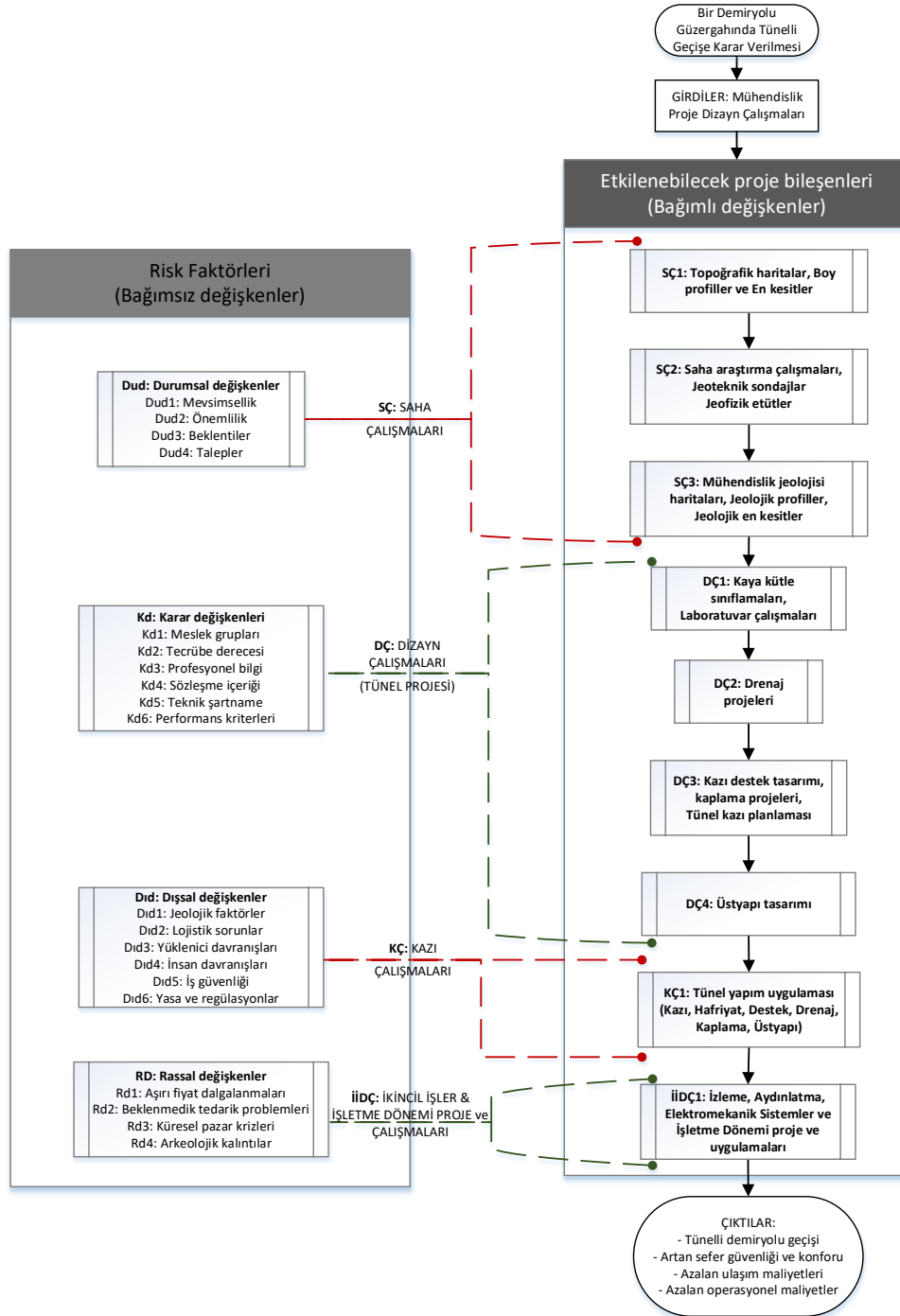
- Durumsal Değişkenler (DuD): Bu gruptaki değişkenler zamana bağlıdır, etkileri ve olasılıkları zamanla değişebilir. Dolayısıyla sistem veya projelerin içindeki durumsal değişkenlerin sürekli olarak izlenmesi gerekir [38].
- Karar Değişkenleri (KD): Bu gruptaki değişkenlerin proje başarısı üzerinde doğrudan ve güçlü etkileri vardır. Ancak, risk yönetim araç ve tekniklerinin kullanılması halinde durumsal değişkenlere göre statik ve daha kolay kontrol edilebilir yapıdadırlar.
- Dışsal Değişkenler (DıD): Bir tünel yapım projesi ile ilgili olarak önsel çalışmalar tasarım aşamasında ne kadar iyi yürütülmüş olursa olsun, tünelin açılacağı jeolojik birimlerin kazı sonrası davranışı ancak kazı başladıktan sonra gözlenebilir [11]. Yeraltı koşullarının tasarım aşamasında öngörülenden bazı farklılıklar göstermesi muhtemeldir. Bunlar bir tünel projesi ile ilgili önceden kontrol edilemeyen dışsal değişkenler içinde sınıflandırılabilir. Ayrıca, insan kaynaklı belirsizlik içeren ve önceden tahmin edilemeyen faktörler de bu grup içinde risk oluşturan değişkenler olarak sınıflandırılabilir. Dolayısı ile bu grup içinde sınıflandırılacak risk ve kontrollerin sürekli olarak izlenmesi gerekir.
- Rassal Değişkenlerdir (RD): Rassal değişkenler beklenmedik bir şekilde ve tamamen dış kaynaktan ortaya çıkarlar [46]. Proje mühendisinin bu gibi değişkenler üzerinde herhangi bir kontrolü olamayacaktır. Rassal değişkenler projeyi, herhangi bir zaman herhangi bir şekilde etkileyebilir. Çoğunlukla proje ile doğrudan bir bağlantıları da yoktur. Ancak bu değişken grubu içinde yer alan belirsizliklere bağlı doğacak riskler projenin ilerlemesinin önünde ciddi bir tehdit oluştururlar.

Yazarın öznel tecrübesi ve bilgi birikimi kullanılarak SYM ile bir tünel projesi için belirlenen değişkenler ve model bileşenleri yukarıda ana hatları ile özetlenmiş ve Şekil 1.'de koşullu bağlantıları verilmiştir. Şekil 1.'de oluşturulan koşullu bağlantılara bağlı oluşabilecek riskler için, uygun istatistiksel modeller kullanılarak (Bayes Ağı, Karar Ağacı Analizi, Monte Carlo Similasyonu vb.) risklere ilişkin olasılıklar da hesaplanabilir. Bu çalışmada verilen senaryo yapılandırma modelinde kullanılan içerik, modelde yer alan değişkenlerin ve risklerin adları değiştirilebilir veya yeniden adlandırılabilir. Burada bağımsız değişkenlere ilişkin tanımlanan riskler ve bunlara bağlı belirsizlikler nitel olarak tanımlanmış ancak tanımlama için sistematik bir yol (senaryo yapılandırma modeli) izlenmiştir. SYM olası riskleri belirlemede kullanılmış ve bu riskler kalitatif olarak değerlendirilmiştir. SYM oluşturulurken Şekil 2.'de verilen örnek iş kırılma yapısı esas alınmıştır. Oluşturulan model ve iş kırılma yapısı projeye yeni bilgiler geldikçe veya proje ihtiyaçlarına uygun şekilde revize edilebilir. Risk değerlendirme için sahadan toplanan sayısal veriler ışığında Bayes Ağı, Karar Ağacı, Monte Carlo Similasyonu gibi kantitatif yöntemler kullanılabilir, bu gibi sayısal yöntemlerin kullanılması risk analizlerin daha nesnel yapılmasına imkan tanıyacaktır. Ancak, bu çalışmanın amacı bugüne kadar önerilmiş olan tünel yapım yöntemleri yer almayan, risk esaslı tünel projelendirme ve yapım yöntemine ilişkin bir farkındalık yaratmaktır. Belirlenen risklere ilişkin değerlendirme için Tablo 1 de yer alan matris kullanılmıştır.

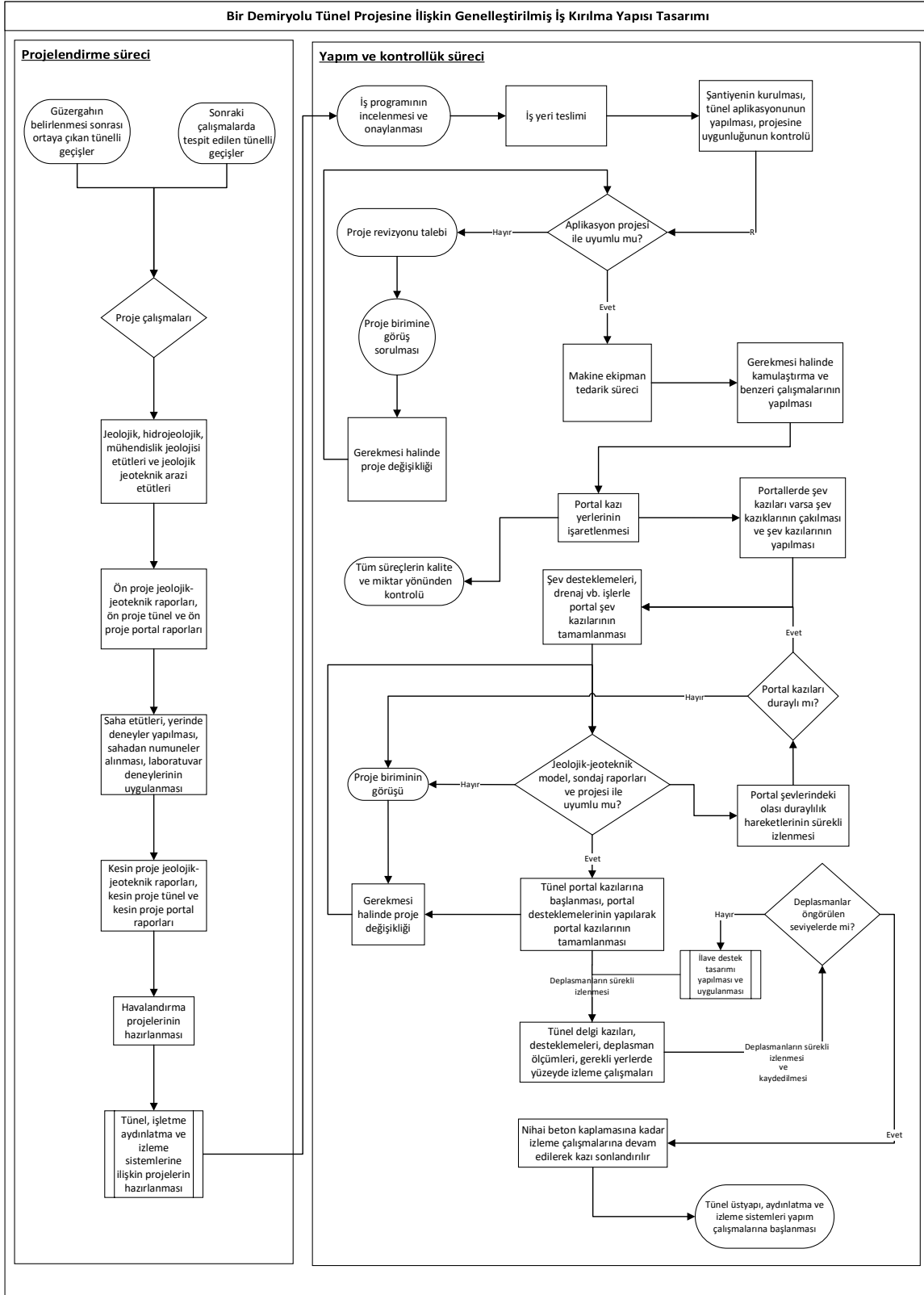
### ***5.1. Demiryolu tünel projesine ilişkin risk esaslı projelendirme ve yapım yöntemi önerisi***

Tablo 2 de SYM ile Şekil 2.'deki iş adımları için belirlenmiş olan risklere ilişkin Tablo 1 aracılığı ile yapılan analiz verilmiştir. Tablo 1 de verilen değerlendirme için eldeki veriler artıkça daha kantitatif ölçütler belirlenebilir. Tablo 1 de verilen risk değerlendirme matrisi aracılığı ile ortaya çıkan risk puanları Tablo 2 de gösterilmiştir. Tablo 2 de elde edilmiş olan risk puanlarına göre proje mühendisi söz konusu riske ilişkin bir alt sınır belirleyerek bu sınırın üstündeki risk puanları

için ya mevcut kontrolleri gözden geçirmeli ya da gerekli ise yeni kontroller tasarlamalıdır. Bu tasarımı yaparken Şekil 2.'dekine benzer bir iş kırılma yapısı oluşturmalı ve Şekil 3.'deki risk yönetim adımlarını uygulamalıdır. Çünkü, bu tip gömülü mühendislik yapılarında riskin neden olduğu sorunlar zincirleme etkiyle sonradan ortaya çıkacak ve bu aşamadan sonra riskin neden olduğu sorunun çözümü çok büyük miktarda zaman, işgücü ve parasal kaynağının harcanmasına neden olacaktır. Kontroller tasarlanırken veya risklere karşı aksiyon alırken izlenmesi gereken işlem adımları ise Şekil 3.'de verilmiştir.



Şekil 1. Demiryolu tünel yapım projesi için SYM modeli, değişkenler ve risk bağımlılıkları



Şekil 2. Demiryolu tünel yapım projesi için örnek bir iş kırılma yapısı tasarımı

**Tablo 1.** Kalitatif risk değerlendirme matrisi [47,48]

		ETKİ				
		Çok düşük (1)	Düşük (2)	Orta (3)	Yüksek (4)	Çok yüksek (5)
OLASILIK	Çok yüksek (5)	11	16	20	23	25
	Yüksek (4)	7	12	17	21	24
	Orta (3)	4	8	13	18	22
	Düşük (2)	2	5	9	14	19
	Çok düşük (1)	1	3	6	10	15

Olasılık Puanları (Geçmiş 10 proje düşünüldüğünde): Çok Yüksek; Her projede ortaya çıkmış, Yüksek; En az 7 projede ortaya çıkmış, Orta; En az 5 projede ortaya çıkmış, Düşük; En az 3 projede ortaya çıkmış, Çok Düşük; En az 1 projede ortaya çıkmış.

Etki Puanları: Çok Düşük; Çok düşük tutarlı mali kayıplar, faaliyetlerde kabul edilebilir aksaklıklar yaşanması, Düşük; Düşük tutarlı mali kayıplar, faaliyetin devamlılığına ilişkin düzeltilebilir düzeyde sorunlar yaşanması, Orta; Proje için orta ölçekli mali kayıplar, faaliyetin bir kısmının belli bir süre ile yürütülememesi ancak ilave kontrollerle sisteme tekrar eski esnekliğin kazandırılabilmesi, Yüksek; Ortaya çıkacak sorunlar nedeni ile kişilerin ciddi yaralanmaları, sakatlanmaları, büyük miktarda mali kayıplar oluşması, kurumsal itibar kaybı, faaliyetin bir süre durması, sosyal rahatsızlıklar oluşması, Çok Yüksek; Ortaya çıkacak sorunların, can kayıpları, çok büyük miktarda mali kayıplar, ciddi itibar sorunları ortaya çıkarması, faaliyetin uzun bir süre yürütülememesi

**Tablo 2.** Tablo 1 ve SYM sonucu yapılan kalitatif risk değerlendirmesi sonucu bulunan risk puanları

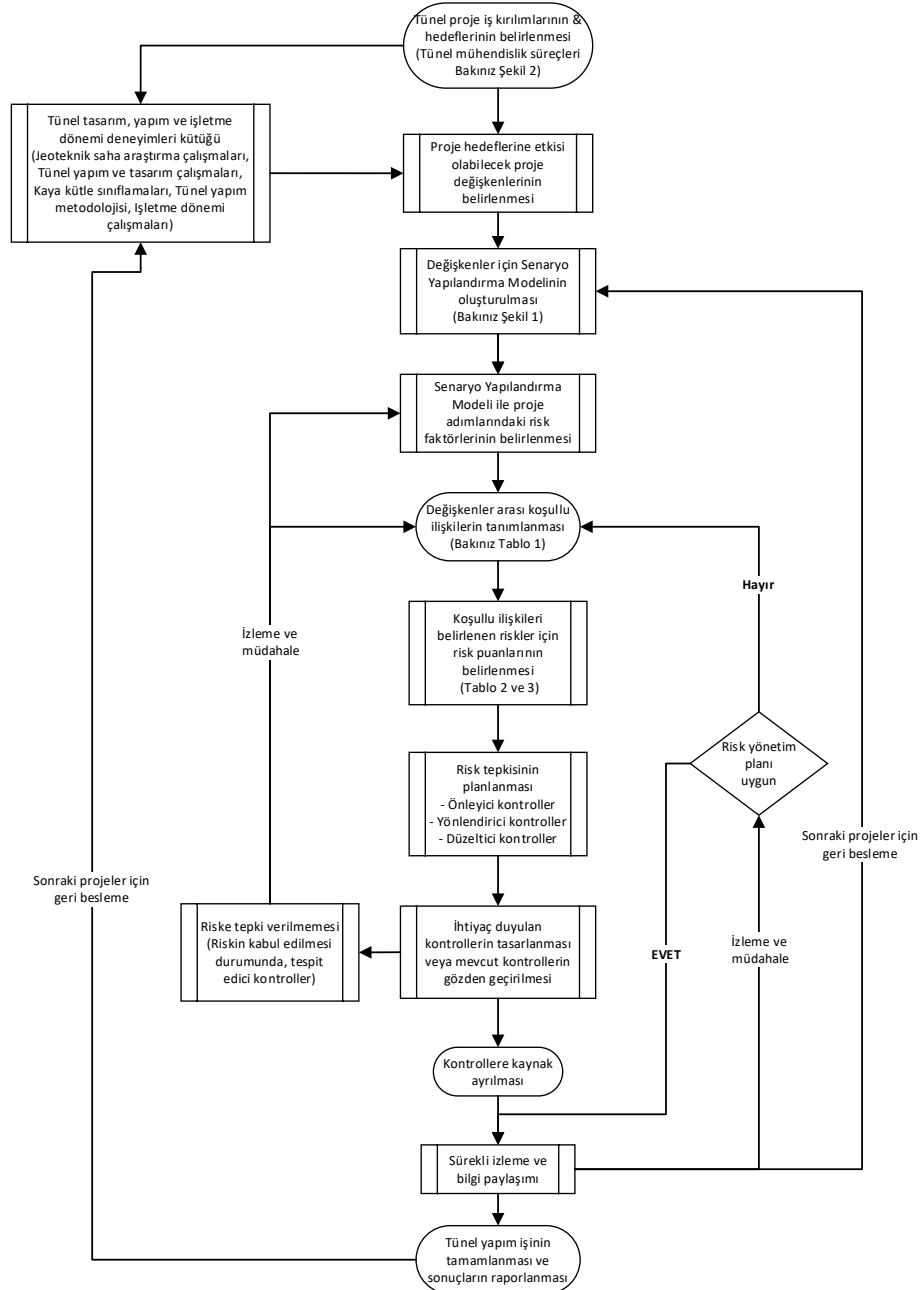
DEĞİŞKENLER	KALİTATİF DEĞERLEME		
	Etki	Olasılık	Puan
<b>Durumsal Değişkenler (Dud)</b>			
Mevsimsel kaynaklı riskler	3	4	17
Proje kaynaklı riskler	3	3	13
Beklenti ve talep kaynaklı riskler	4	3	18
Projenin önemi kaynaklı riskler	4	4	21
<b>Karar Değişkenleri (Kd)</b>			
Mesleki köken kaynaklı riskler	5	1	15
Mesleki bilgi kaynaklı riskler	5	2	19
Şartname ve sözleşme kaynaklı riskler	5	1	15
<b>Dışsal Değişkenler (Dıd)</b>			
Lojistik kaynaklı riskler	5	2	19
İş Sağlığı ve güvenliği kaynaklı riskler	5	2	19
Mevzuat kaynaklı riskler	3	2	9
Yüklenici tutumu kaynaklı riskler	4	3	18
İnsan davranışları kaynaklı riskler	4	4	21
Jeolojik koşullar kaynaklı riskler	5	3	22
<b>Rassal (RD)</b>			
Tedarik zinciri kaynaklı riskler	4	2	14
Para piyasaları kaynaklı riskler	5	1	15
Küresel pazar kaynaklı riskler	5	1	15
Arkeolojik kalıntı kaynaklı riskler	5	1	15

Tablodaki renkler risk öncelik şiddetlerini ifade etmektedir: yeşil az, sarı orta ve kırmızı çok öncelikli risk sınıflarını göstermek için kullanılmıştır.

Şekil 1 ve 2.'de de gösterildiği gibi tünel projesine ilişkin ilk aşamalar saha çalışmaları ve tasarım (SÇ, TÇ) çalışmalarıdır. Bu iki çalışma bir arada jeoteknik etütler ve tasarımlar olarak adlandırılabilir. Bu aşamalardan kaynaklanan riskler tünel kazısı başladıktan sonra duraysızlık ve güvenlik problemlerine neden olarak ortaya çıkacaktır. Bu durumda tünel güvenliği ve



duraylılığının sağlanması için ilave zaman ve sermaye gerekecektir. Dolayısı ile aslında bu çalışmada tespit edilen risklerin büyük çoğunluğu yapım aşamasında ortaya çıkabilecek problemlerin önlenmesini hedeflemektedir. Yapımı sonrası işletmeye alınarak kullanıma açılacak ve yaşayan bir yapı haline gelecek olan bu tip projelerde istenilen teknik standartların sağlanmadan hizmete sunulması mümkün değildir. Sonuç olarak kalite ve teknik standartlar açısından nihai hedeften sapma kabul edilemez. Ancak, eksik olan teknik gereklilikleri tamamlamak zaman ve bütçe yönünden sapsmalara neden olacaktır.



Şekil 3. Risk yönetim esaslı demiryolu tünel yapım projesi uygulama modeli adımları

Tespit edilen risklere karşı alınacak ilave önlemler yani uygulamaya konulacak yeni kontroller, risk tepkisi olarak adlandırılır. Risk tepkisi sadece yapım aşamasında değil tasarım ve saha etütleri aşamasında da uygulanabilir. Bir kez uygulandıktan sonra ilgili proje değişkenlerinin sürekli izlenmesi ve gözden geçirilmesi gerekir. Risklere karşı verilen tepkiye rağmen proje adımlarında

veya alt adımlarında herhangi bir sapma meydana gelirse bunların hızlı bir şekilde düzeltilmesi veya yeni düzenlemelerin (yeni kontroller) yapılması gerekir [49]. Bu çalışmada önerilen yöntemle risk kavramı ve risk yönetiminin temel süreçlerini tünel mühendisliği disiplini ile birleştirerek, bir tünel projesinin yeri, uzunluğu, yapım amacı ve kazı için seçilen yöntemden bağımsız olarak ortaya çıkabilecek riskler maliyet etkin bir şekilde yönetilebilir. Ayrıca burada önerilen yöntem yaygın kullanılan NATM ve ADECO gibi yöntemlerin öznel ve kalitatif yapısından [50] kaynaklanacak risklerin tespit edilmesi ve bu gibi yöntemlerin daha etkili kullanımına imkan vermektedir.

## 6. Bulgular

Demiryolu tüneli gibi yer mühendisliği projeleri ile ilgili hesaplamalar ve analizler ne kadar hassas yapılırsa yapılsın sıklıkla önceden öngörülemeyen sorunlar ortaya çıkabilir. Yer küre gibi homojen ve izotrop olmayan, aksine oldukça karmaşık bir yapısı olan ortamda yapılan mühendislik projelerinde oluşturulan jeolojik modeller, jeoteknik saha çalışmaları, tasarım aşamasında kazı ve destek sistemine ilişkin analizler uygulama sırasında ortaya çıkabilecek sorunları asgariye indirmeyi amaçlamaktadır. Bir tünel projesinin kazı destek tasarımı aşamasındaki çalışmalar tünel kazısı yapılacak olan jeolojik yapının mühendislik parametreleri ve ilgili jeolojik yapının kazı sonrası vereceği tepkinin öngörülmesi esasına dayanmaktadır. Tüm bu çalışmalar ise kazı ve destek sisteminin (nümerik modellemeler ve destek tasarımı) girdileridir. Aynı zamanda tüm bu veriler çeşitli bilinen tünel yapım yöntemleri içinde birer girdi niteliğindedir. Dolayısı ile tasarım aşamasında yapılan hata ve eksiklikler yapım aşamasında duraylılık ve güvenlik problemleri olarak ortaya çıkacaktır. Ancak, bu hata ve eksikliklerden kaynaklanacak risklerin etkileri hızlı ve kolay bir şekilde ortaya çıkmaz. Bu nedenlerle, kazı başladıktan sonra, tasarım aşamasında yapılan tasarım ve hesaplamalar mevcut içsel ve dışsal koşullara göre izlenmeli ve gerekirse revize edilmelidir. Tünel mühendisi, sadece tasarım aşamasında açıklanan kaya kütle koşullarını izlemek ve değerlendirmekle yetinmemeli aynı zamanda deformasyon sonuçlarını, kazı hızını, kazı ekibinin davranışlarını, çevresel koşulları, sözleşme koşullarını ve diğer teknik olmayan koşulları da göz önüne almalı ve değerlendirmelidir. Zira, sözü edilen tüm bu faktörler belirsizlik içerir ve risk yönetim araç ve teknikleri kullanılarak değerlendirilmelidir. Kazıya karşı kaya kütlelerinin göstereceği davranış ve diğer jeoteknik parametreler de burada açıklanan yöntemlerle öznel bir değerlendirme ile tünel mühendisinin kullanımına sunulmaktadır. Bu çalışmada belirlenen aşamaların sayısı ve isimleri değişebilir, ancak özellikle tasarım aşamasındaki çalışmalar (saha çalışmaları ve kazı destek sistemi tasarımları) mutlaka risk esaslı şekilde değerlendirilmeli, riskleri tanımlanmalı ve bu risk değerlendirmesine uygun olacak şekilde tasarımlar gözden geçirilmeli ve bir sonraki aşamaya geçmeden gerekli düzeltme ve düzenlemeler yapılmalıdır.

## 7. Sonuç

Bu çalışmada, bir yeraltı mühendislik yapısı ile ilgili çalışmaların felsefesi ve kalitesi ile ilgili teknik değerlendirme yapmak yerine, tasarım ve yapım aşamalarında ortaya çıkabilecek hata ve eksikliklerin önlenmesi ve düzeltilmesine ilişkin risk esaslı projelendirme ve yapım strateji önerisi ortaya konulmuştur. Çalışma tünel proje ve yapım risklerine karşı yarı kantitatif ve sistemli bir risk değerlendirme yöntemi sunmaktadır. Bu amaçla, senaryo yapılandırma modeli ile belirsizlik kaynakları tanımlanmış, etki olasılık analizleri ile yönetilmesi gereken risklere ilişkin bir model ortaya konulmuştur. Bu şekilde proje mühendisi projenin ilerlemesi aşamasında muhtemel sorunlu alanları anlayabilecek ve olası hata ve eksikleri yönetebilme şansına sahip olacaktır. Böylece, Rabcewicz'in ilerledikçe projelendirme felsefesine uygun şekilde tünel projesi riskleri optimize edilebilecek ve en iyi yapım stratejisi uygulanabilecektir. Zira NATM ve ADECO R.S. sistemleri tünel mühendisinin tünel kazısına ilişkin öznel değerlendirme yapmasını gerekli kılar. Ancak, kazı stratejisi ve destek paterni jeolojik ve jeoteknik verilere bağlıdır. Bu iki önemli veri de karmaşık ve değişen yer koşulları nedeniyle belirsizlik içerir, risklerin yönetilmesi

gerekir. Burada önerilen risk esaslı tünel proje yönetimi yaklaşımı, proje verilerinin yerindeki kazı koşullarına uygunluğunun değerlendirmesine, destek sistemi ve kazı stratejisine uygunluğuna ilişkin risk yönetim felsefesi temelli bir yaklaşım sağlamaktadır. Ayrıca tünel kazısını geciktirecek veya güvenlik problemlerine neden olabilecek risklere karşı pro-aktif şekilde önlem alma imkanı sunmaktadır. Sonuç olarak, tünel mühendisine tünel projesinin maruz kalabileceği riskleri tanımlayabilmeyi ve bu riskleri yönetebilme imkanı sunmaktadır.

### Teşekkür

Bu çalışmada demiryolu yapım ve projelendirme işleri ile ilgili sunduğu teknik bilgi ve desteklerinden dolayı Sayın Osman ALTINORDU' ya teşekkür ederim.

### Kaynakça

- [1] O. Satici, Topal T., “Evaluation of tunnel excavation methods in accordance with engineering geology and rock mass classification systems”, *Journal of Geological Engineering* 39 (1), 2015
- [2] F. Tonon, Sequential excavation, NATM and ADECO: what they have in common and how they differ, *Tunneling and Underground Space Technology*, 25(3) pp245–265, 2010, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2009.12.004>
- [3] T.E. Brown, “Risk assessment and management in underground rock engineering—an overview”, *Journal of Rock Mechanics And Geotechnical Engineering*, v4 (3), pp193–204, 2012, <https://doi.org/10.3724/SP.J.1235.2012.00193>
- [4] J. Daller, “Risk control at the design of a 13 km long railway tunnel in Austria”, *Geotechnical Risks in Rock Tunnels*, Taylor & Francis Group, London, ISBN 0-415-40005-8, pp155-163, 2006, <https://doi.org/10.1201/9780203963586>
- [5] M. Deng, “Challenges and thoughts on risk management and control for the group construction of a super-long tunnel by TBM”, *Engineering*, v4, pp112–122, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.07.001>
- [6] D.S. Eskesen, P. Tengborg, J. Kampman, H.T. Veichherts, “Guidelines for tunneling risk management”, *International Tunneling Association, Working Group No. 2, Tunneling and Underground Space Technology*, v19, pp217–237, 2004
- [7] D. Fabbri, “Risk, contract management, and financing of the gotthard base tunnel in Switzerland”, *Engineering*, v5 pp379–383, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.04.001>
- [8] J.D. Gutierrez-Fernandez, S.S. Rodriguez, H. Gonzalo-Orden, H. Perez-Acebo, “Analysis of rock mass classifications for safer infrastructures”, *Transportation Research Procedia*, v58 pp606–613, 2021
- [9] X. Lei, “Risk assessment model of underground engineering based on Delphi-AHP”, *2nd International Conference on Oil & Gas Engineering and Geological Sciences*, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2020, pp558, 032029, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/558/3/032029>
- [10] I. Poeschl, J. Kleberger, “Geotechnical risk in rock mass characterization – A Concept”, *Geotechnical Risks in Rock Tunnels*, Taylor & Francis Group, London, ISBN 0-415-40005-8, pp145-154, 2006
- [11] P. Schubert, “Geotechnical risk management in tunneling”, *Geotechnical Risks in Rock Tunnels*, Taylor & Francis Group, London, ISBN-0-415-40005-8, pp53-62, 2006
- [12] J. Schuyler, “Risk and decision analysis in projects”, *Project Management Institute Publication*, 2nd edition, p278, 2001
- [13] K. Shahriar, M. Sharifzadeh, K.J. Hamidi, “Geotechnical risk assessment-based approach for rock TBM selection in difficult ground conditions”, *Tunneling and Underground Space Technology*, v23, pp318–325, 2008
- [14] R.L. Sousa, H.H. Einstein, “Risk analysis during tunnel construction using bayesian networks: Porto Metro case study”, *Tunneling and Underground Space Technology*, Risk Analysis During Tunnel Construction Using Bayesian Networks: Porto Metro case study, 27, pp86–100, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.07.003>
- [15] L.R. Sousa, T. Miranda, R.L. Sousa, J. Tinoco, “The use of data mining techniques in rockburst risk assessment”, *Engineering*, v3, pp552–558, 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/J.ENG.2017.04.002>
- [16] J. Spross, L. Olsson, H. Stille, “The Swedish geotechnical society’s methodology for risk management: a tool for engineers in their everyday work”, *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 12:3, 183-189, 2018, <https://doi.org/10.1080/17499518.2017.1416643>

- [17] M. Tidlund, J. Spross, S. Larsson, “Observational method as risk management tool: The Hvalfjörður Tunnel Project”, *Iceland, Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 2022, <https://doi.org/10.1080/17499518.2022.2046784>
- [18] Y. Xiang, C. Liu, K. Zhang, Q. Wu, “Risk analysis and management of submerged floating tunnel and its application”, *Procedia Engineering*, v4, pp107–116, 2010, <https://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2010.08.013>
- [19] C. Zhang, N. Liu, W. Chu, “Key technologies and risk management of deep tunnel construction at Jinping II Hydropower Station”, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v8 pp499-512, 2016
- [20] G. Brierley, “Tunneling: A Historical Perspective” 2014, <http://tunnelingonline.com/tunneling-historical-perspective/> [06 Kasım 2023]
- [21] G.E. Sandström, “The history of tunneling, underground workings through the ages”, Barrie and Rockliff, 1963
- [22] N.R. Barton, R. Lien, J. Lunde, “Engineering classification of rock masses for the Design of tunnel support” *Rock Mechanics* 6(4), 189-239, 1974, <https://doi.org/10.1007/BF01239496>
- [23] Z.T. Bieniawski, “Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining”, *Civil and Petroleum Engineering*: New York, John Wiley and Sons, xii, p251, 1989, ISBN: 978-0-471-60172-2
- [24] W.W. Lowrance, “Of Acceptable risk”, Los Altos, CA: William Kaufmann, 1976
- [25] M. Karakus, R.J. Fowell, “An insight into the New Austrian Tunneling Method (NATM)”, *Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu*, 2004, Sivas, Türkiye
- [26] P. Lunardi, “Design and construction of tunnels, Analysis of Controlled Deformation in Rock and Soils (ADECO-RS)”, *Springer*, 2008
- [27] L. Özdemir, “North American Tunneling”, Washington, DC: Taylor & Francis. p246, ISBN 0-415-40128-3, 2006
- [28] C.L. Vydrova, “Comparison of tunneling methods NATM and ADECO-RS”, *The Civil Engineering Journal*, 2015, <http://dx.doi.org/10.14311/CEJ.2015.01.0003>
- [29] A. Palmstrom, “RMi-A system for characterizing rock mass strength for use in rock engineering”, *Journal of Rock Mechanics and Tunneling Technology*, v1, pp69-108, 1996
- [30] D.U. Deere, R.P. Miller, “Engineering classification and index properties for intact rock”, *Tech. Rept.* No AFWL-65-116, 1966
- [31] E. Hoek, E.T. Brown, “Practical estimates of rock mass strength”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v34, pp 1165-1186, 1997
- [32] E. Ünal, and İ. Özkan, “Determination of classification parameters for clay-bearing and stratified rock mass”, *9th Conference on Ground Control in Mining*, Morgantown, USA, 1990, pp250-259
- [33] G.E. Wickham, H.R. Tiedemann, E.H. Skinner, “Support determination based on geologic predictions”, In: Lane, K.S.a.G., L. A., ed., *North American Rapid Excavation and Tunneling Conference: Chicago, New York: Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*, 1972, pp43-64
- [34] K. Terzaghi, “Rock defects and loads on tunnel supports”, In Proctor, R.V., and White, T.L., eds., *Rock Tunneling with Steel Support*, Volume 1: Youngstown, Ohio, Commercial Shearing and Stamping Company pp17-99, 1946
- [35] L. Rabcewicz, “The New Austrian Tunneling Method”, Part one, *Water Power* (November), 453–457, part two, *Water Power* (December), pp511–515, 1964
- [36] Y.Y. Haimes, “On the definition of vulnerabilities in measuring risks to infrastructures”, *Risk Analysis*, v26-2, 2006, DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2006.00755.x>
- [37] P. Hopkin, “Fundamentals of risk management, understanding evaluating and implementing effective risk management”, *The Institute of Risk Management*, Kogan Page Limited, p385, 2018
- [38] Y.Y. Haimes, “On the complex definition of risk: a systems-based approach”, *Risk Analysis*, v29, p1647–1654, 2009a, <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2009.01310.x>
- [39] S. Kaplan, B.J. Garrick, “On the quantitative definition of risk”, *Risk Analysis*, 1, pp11-27, 1981, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1539-6924.1981.tb01350.x>
- [40] Y.Y. Haimes, “On the definition of resilience in system”, *Risk Analysis*, v29, p498–501, 2009b, <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2009.01216.x>
- [41] V. Proag, “The concept of vulnerability and resilience”, *4th International Conference on Building Resilience, Procedia Economics and Finance*, v18, 2014, pp369-376,
- [42] Ö. Satıcı, “Projeler nasıl başarılı olur, mühendisler için risk yönetim rehberi”, Seçkin Yayınevi, Ankara, 156s, 2021

- [43] N. Munier, “Project management for environmental construction and manufacturing engineers”, *A Manuel for Putting Theory into Practice*, Springer, p262, 2013
- [44] V. Platon, A. Constantinescu, “Monte Carlo method in risk analysis for investment projects”, *Procedia Economics and Finance*, v15, p393-400, 2014, [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00463-8](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00463-8)
- [45] K.D. Prasanta, “Project risk management using multiple criteria decision-making technique and decision tree analysis: a case study of Indian oil refinery”, *Production Planning & Control*, 23:12, 903-921, 2012, <https://doi.org/10.1080/09537287.2011.586379>
- [46] N.N. Taleb, “The Black Swan: the impact of the highly improbable”, Penguin Books Ltd. p480, 2008
- [47] D. Ristic, “A tool for risk assessment”, *Safety Engineering*, p121-127 Doi: 10.7562/SE2013.3.03.03
- [48] <https://www.nzta.govt.nz/roads-and-rail/rail/operating-a-railway/risk-management/risk-matrix-likelihood-and-consequence-tool/> (Son erişim 07.12.2023)
- [49] D. Hillson, “Managing risk in projects”, *Fundamentals of Project Management*, Gower Publishing, p127, 2009
- [50] E. B. Aygar, “Tünel projelendirilmesinde kullanılan yöntemler (ampirik, analitik ve nümerik yöntemler), kısıtlamaları, karşılaştırılması ve öneriler,” *Demiryolu Mühendisliği Dergisi*, sy. 15, ss. 125–133, Ocak 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1030404.

### Özgeçmiş



### Özgür SATICI

Lisans eğitimini Hacettepe Üniversitesinde, yüksek lisans: eğitimini Ankara ve Hacettepe Üniversitelerinde, doktora eğitimini ODTÜ’de tamamlamıştır. Karayolları Genel Müdürlüğü’nde ARGE Dairesinde Mühendis, İç Denetim Birimi Başkanlığında İç Denetçi olarak çalışmıştır. Şu an İç Denetim Birimi Başkanı görevini devam ettirmektedir. İlgi alanları; jeoteknik, mühendislik jeolojisi, kaya mekaniği, tüneller, sayısal modeller, saha etütleri, mühendislik proje yönetimi, risk yönetimi ve analizleridir.

E-Posta: osatici@kgm.gov.tr, osatici@gmail.com

### Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayım etiğine uyulmuştur.