

BİR TÜNELDE DEPREM ETKİSİ ALTINDA OLUŞAN DEFORMASYONLARIN ONARIM AMAÇLI DEĞERLENDİRİLMESİ

ASSESSMENT OF DEFORMATIONS OCCURED UNDER THE EFFECT OF EARTHQUAKE IN A TUNNEL FOR REPAIR PURPOSE

Ebru ERBEYOĞLU¹, Emre ÖZYÜREK², A. Onur USTAOĞLU³, Candan GÖKÇEOĞLU⁴

ÖZET

TCDD tarafından yapımı gerçekleştirilen, Osmaniye'nin Bahçe ve Gaziantep'in Nurdağı ilçelerini birbirine bağlayacak olan Bahçe- Nurdağı demiryolu hattı, her biri 10.200 metrelik uzunluğa sahip çift tüp TBM demiryolu tüneline bünyesinde barındırmaktadır. Bu tüneller T1 ve T2 olarak isimlendirilmiş olup, hizmete girdiğinde Türkiye'nin en uzun demiryolu tüneline unvanına sahip olacaktır. Bahsi geçen tünellerden T2 tüneline ait inşaat Mayıs 2020 tarihinde tamamlanmış olup, 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen merkez üssü Pazarcık (Kahramanmaraş) ve Elbistan (Kahramanmaraş) olan Mw: 7.7 ve Mw: 7.6 büyüklüğündeki iki deprem sonucunda bazı prekast tünel segmentleri üzerinde çatlaklar, kavlamalar ve aşırı deformasyonlar oluşmuştur. Meydana gelen hasarları onarmak amacıyla segmentler yerinde incelenmiş ve çeşitli metotlarla tüneline onarımı gerekmiştir. Meydana gelen deformasyonların türüne göre iki farklı onarım kesiti belirlenmiştir. Prekast segmentlerin yük taşıma kapasitesinin tamamen kaybolduğu belirlenen kesitlerde kaplama tamamen değiştirilmiş, yüzeysel kavlama ve çatlakların bulunduğu kesitlerde ise prekast segment korunarak segment üzerinden güçlendirme kesiti oluşturulmuştur. Belirlenen iki farklı onarım kesiti için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizler yapılmış ve tasarım gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında tüneline deformasyon oluşan bölümlerinde, onarım için yapılmış olan farklı tasarımların analiz sonuçları değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Tünel, 6 Şubat 2023 Depremleri, TBM, Onarım, Deprem Etkisi

¹ Yüksek İnşaat Mühendisi, Progeo Proje Müh. Müş. San. Ve Tic. Ltd. Şti, e.erbeyoglu@progeo.com.tr
(Sorumlu Yazar)

² Yüksek İnşaat Mühendisi, Progeo Proje Müh. Müş. San. Ve Tic. Ltd. Şti, e.ozyurek@progeo.com.tr

³ Yüksek İnşaat Mühendisi, Progeo Proje Müh. Müş. San. Ve Tic. Ltd. Şti, o.ustaoglu@progeo.com.tr

⁴ Prof. Dr., Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü,
candan.gokceoglu@gmail.com



ABSTRACT

The Bahçe - Nurdağı railway line, which is constructed by TCDD and will connect the Bahçe district of Osmaniye and the Nurdağı district of Gaziantep, contains double tube TBM railway tunnels, each having a length of 10.200 meters. These tunnels are named T1 and T2, and will be the longest railway tunnel in Türkiye when taken into service. The construction of the T2 tunnel, one of the above-mentioned tunnels, was completed in May 2020. After the completion of construction, two earthquakes occurred on 6 February 2023 with epicenters in Pazarcık (Kahramanmaraş) and Elbistan (Kahramanmaraş). Magnitudes of these earthquakes are Mw: 7.7 and Mw: 7.6. As a consequence of these earthquakes, cracks, spalling, and excessive deformations developed on some precast tunnel segments linings. In order to repair the damages, segmental linings were investigated and it was concluded that the tunnel needed to be repaired using various methods. Two different repair sections were determined depending on the type of the deformations. In the sections where the load-carrying capacity of the precast segments was determined to be completely lost, the lining was completely replaced, and in the sections where surface spalling and cracks were present, the precast segmental lining was preserved and a reinforcement section was designed. In order to perform the design of repair sections, finite element method was used. Within the scope of this study, different designs for repair in the damaged sections of the tunnel were investigated.

Keywords: Tunnel, 6 February 2023 Earthquakes, TBM, Repair, Earthquake Impact



1. Giriş

Karayolu ve demiryolu hatlarında bulunan sanat yapıları, ulaşımın güvenliği, hızı ve konforu açısından hayati bir öneme sahiptir. Özellikle alternatif çözümleri uygulanabilir olmayan tünel ve viyadük gibi yapılar, hattın performansını doğrudan etkileyen temel unsurlardır. Bu yapılar, hattın hız ve konforunu artırarak operasyonel verimliliğe önemli katkılar sunmaktadır. Ayrıca, hattın işletmeye alınmasındaki en kritik zamansal faktör, bu yapıların inşasının hızlı bir şekilde tamamlanmasıdır. Özellikle tünellerin bulunduğu jeolojik koşullar göz önüne alındığında, tünel inşaat süreci büyük önem taşımaktadır. Tünel inşaatında kullanılan metodolojilerin gelişimi, bu sürecin hızlanmasına katkı sağlamaktadır. Özellikle tünel açma makinesi (TBM) tünencililiğinin yaygınlaşmasıyla birlikte, tünel güvenliği ve inşaat hızı önemli ölçüde iyileşmiştir. Ancak, bu yapıların güvenliğinde meydana gelebilecek herhangi bir olumsuzluk, hattın kullanımını ciddi ölçüde etkileyebilir. Bu nedenle, sanat yapılarının tasarımı ve güvenli bir şekilde inşa edilmesi, hattın sorunsuz ve güvenli bir şekilde işletilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Günümüzde altyapı projeleri, yapısal sağlamlık ve dayanıklılık açısından önemli zorluklarla karşılaşmaktadır. Özellikle ülkemizin karmaşık jeolojik yapısı ve birçok aktif fay hattına sahip bir deprem kuşağında yer alması, sanat yapılarının tasarımında depremin büyük bir risk unsuru olarak değerlendirilmesini gerektirmektedir. Bu nedenle, deprem tehlikesi, sanat yapılarının tasarım ve inşasında güvenliği sınavan temel unsurlar arasında yer almaktadır.

Bu bağlamda, 10 km uzunluğundaki Bahçe-Nurdağı Demiryolu Tüneli, zorlu jeolojik ve geoteknik koşullara rağmen TBM teknolojisi kullanılarak başarıyla inşa edilmiştir (Gökçeogđlu, 2022). Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) tarafından yürütölen Adana – Gaziantep – Malatya konvansiyonel hattı kapsamında, Osmaniye ilinin Bahçe ilçesi ile Gaziantep ilinin Nurdağı ilçesini birbirine bağlayacak olan Bahçe-Nurdağı Tüneli, Çukurova ve Güneydoğu Anadolu bölgelerini birbirine bağlayan hattın 17,00 km kısalmasını sağlayacaktır. İlgili hattın KM: 3+050,00 ile KM: 13+453,00 arasında, yaklaşık 10 km uzunluğunda 8,00 m çapında iki tüp olarak planlanan Bahçe-Nurdağı Tüneli T2 tüpü inşaatı, Mayıs 2020 tarihinde tamamlanmıştır. T1 tüpü inşasının devam ettiği 6 Şubat 2023 tarihinde Türkiye saati ile 04:17'de ve 13:24'de merkez üssü Pazarcık (Kahramanmaraş) ile Elbistan (Kahramanmaraş) olan Mw: 7.7 ve Mw: 7.6 büyüklüğünde iki deprem meydana gelmiştir. Peş peşe meydana gelen bu depremler sonucunda imalatı tamamlanan T2 Tüneli KM:11+696,40 - 13+143,80 arasında, farklı bölgelerde ve TBM ringlerinde kırılmalar, bozunmalar ve bölgesel kabarmalar meydana gelmiştir.

Depremler sonrasında, T2 tünelinin KM:11+696,40 - 13+143,80 aralığında meydana gelen hasarlı segmentlerin yenilenmesi planlanmış ve segmentlerin hasar durumlarına göre iki farklı onarım metodolojisi ve tasarımı geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında incelenen onarım yöntemleri, TBM onarımına yönelik literatüre önemli bir katkı sağlayacaktır.

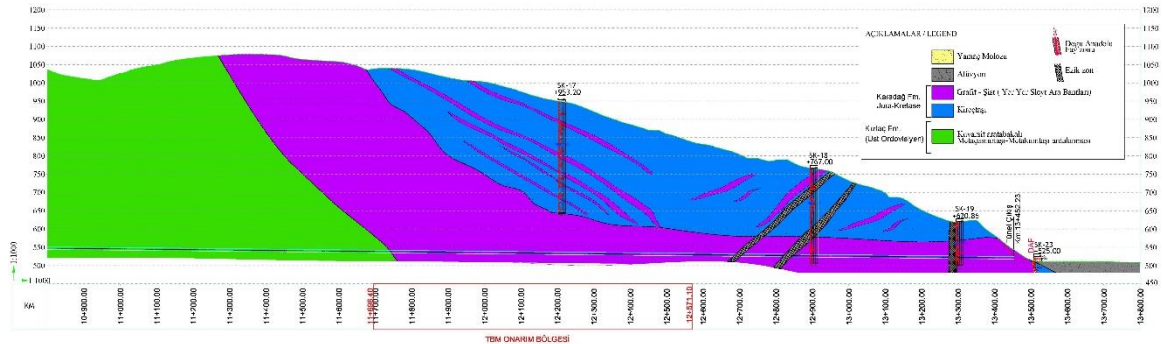


1.1. Jeolojik ve Geoteknik Koşullar

Bahçe-Nurdağı Tüneli Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) tarafından yürütülen Adana – Gaziantep – Malatya konvansiyonel hattı üzerinde Osmaniye ili'nin Bahçe ile Gaziantep ilinin Nurdağı ilçeleri arasında bulunmaktadır.

Tünel güzergahları boyunca hakim olan birimler meta-çamurtaşı/meta-kumtaşı ardalanması, kuvarsit ve kireçtaşı-şeyl-şist ardalanmasıdır. Sahada yapılan mostra çalışmaları sonucunda bu birimlerin az - orta ayrışmış, orta sağlam -sağlam dayanımlı birimler olduğu tespit edilmiştir. Fakat çıkış portalına yakın kesimde yer alan Karadağ Formasyonuna ait kireçtaşı-şist ardalanması, Doğu Anadolu Fay zonundan etkilenecek kırıklı-faylı bir yapıya sahip olmuştur (SK-18, SK-19 ve SK-23). Ayrıca Nurdağı tünel güzergahında, giriş portalından yaklaşık 11+500 km'ye kadar geçilecek metakumtaşı ve kuvarsit seviyelerinde, yer yer mevsimine göre sınırlı miktarlarda, düşük debili (yaklaşık 2-3 lt/sn), yüksek su basınçlı (30 bar) yeraltı suyu ile karşılaşılması doğaldır. Km: 11+500'den itibaren karstik yapıdaki kireçtaşı seviyelerine girildiğinde, su gelininin artması ve şist ile bariyer oluşturulmuş zonların geçilmesinden sonra gerideki kireçtaşından ani boşalmalar olması beklenmektedir. (Fugro Sial-2012)

Hasar gören bölgelerin bulunduğu Km:10+813,00 – 13+452,00 arasında bulunan sondajlar, laboratuvar deneyleri ve tünel kazısı esnasında elde edilen bulgular göz önüne alınarak Şekil 1'de verilen TBM onarım bölgesine ait jeolojik profil oluşturulmuş ve birimlere ait analiz parametreleri oluşturulmuştur. (Progeo-2023)



Şekil 1. Km:10+800 – 13+450,00 arası Jeolojik profil

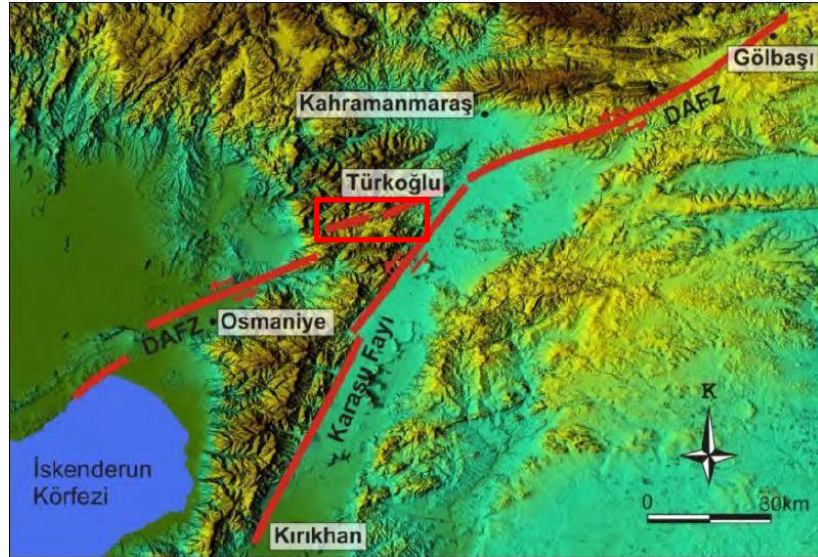
Tablo 1. Birimlere ait jeoteknik parametreler

| | Birim | Şist |
|--------------------------------------|-------------------|--------|
| Tek Eksenli Dayanım (UCS) | MPa | 60 |
| Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI) | - | 30 |
| Malzeme Sabiti (mi) | - | 9 |
| Örselenme Faktörü (D) | - | 0 |
| Elastisite Modülü (Ei) | MPa | 6460 |
| Birim Hacim Ağırlık (γ) | kN/m ³ | 26 |
| Kohezyon (c) | kPa | 1,058 |
| içsel Sürtünme Açısı (\emptyset) | ° | 31,31 |
| Deformasyon modülü (Em) | MPa | 525,74 |

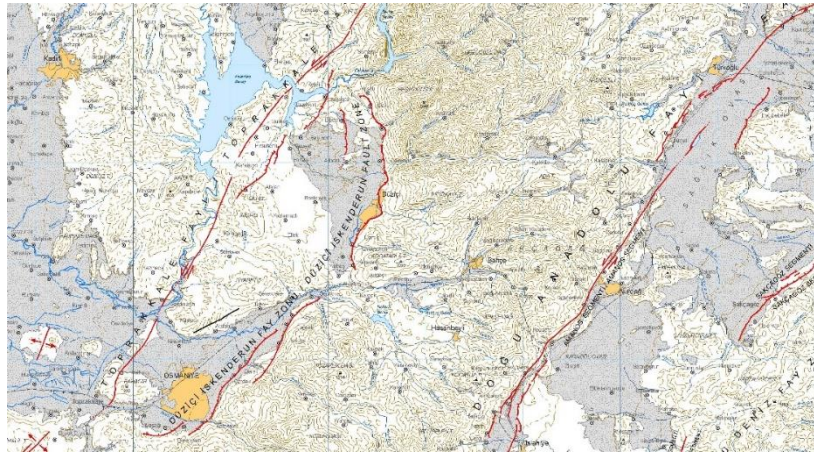


1.2. Deprem Durumu

Proje alanı Türkiye'nin en önemli aktif tektonik unsurlarından olan Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) ile Ölü Deniz Fay Zonu'na (ÖDFZ) oldukça yakında yer almaktadır. Çalışma alanının ilgili faylara göre konumu Şekil 2'de gösterilmiştir. Maden Tetkik Arama Entitüsü'nün (MTA) hazırladığı, "Türkiye Aktif Fay Haritasına" göre çalışma alanının konumu Şekil 3'de verilmiştir.



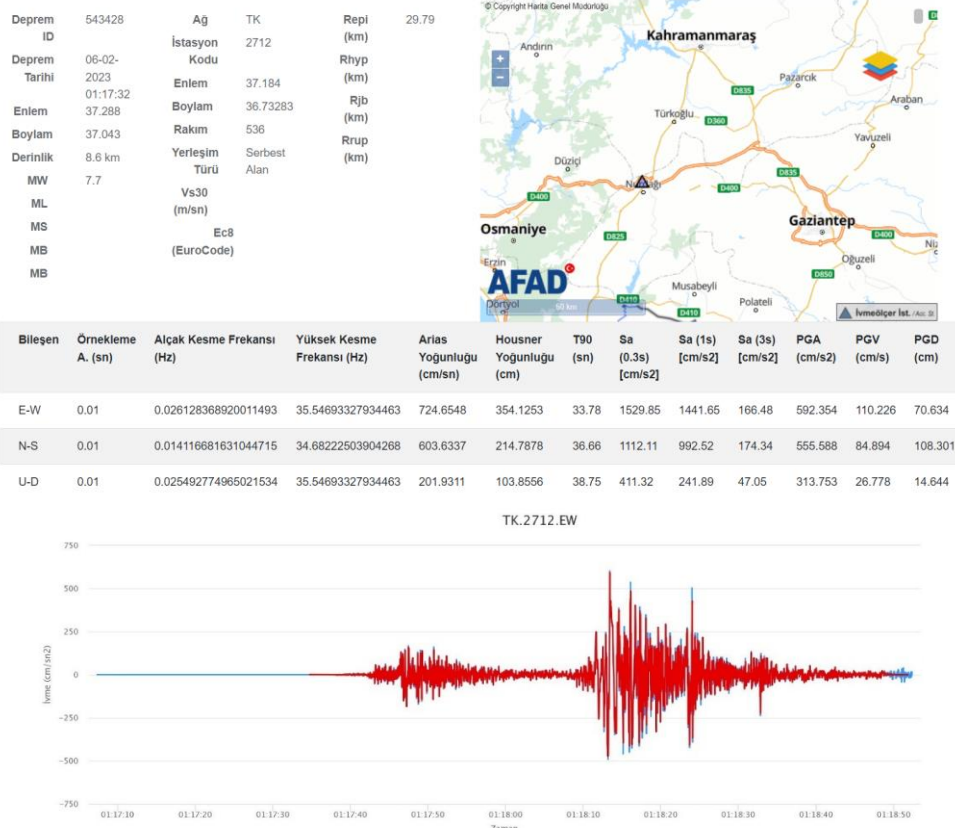
Şekil 2. DAFZ'nun güneybatı uzanımı ile Karasu Fayı'nın konumları (Fugro Sial-2014).



Şekil 3. Çalışma alanı ve yakın çevresi diri fay haritası (MTA-2012)

AFAD interaktif deprem haritası verilerine göre, çalışma alanındaki en büyük yer ivmesi (PGA) 0,4g olarak belirlenmiş olmasına rağmen, TADAS uygulaması üzerinden elde edilen bölgeye en yakın ölçüm istasyonu olan Nurdağı ölçüm istasyonu verileri onarım analizlerinde kullanılmıştır. TADAS uygulaması verilerine göre, çalışma alanında Doğu-Batı yönündeki en büyük yer ivmesi (PGA) 0,592g olarak tespit edilmiştir. Bu bulgulara dayanarak, tünelin bulunduğu derinlik göz önünde bulundurularak yatay sismik ivme katsayısı 0,301g olarak belirlenmiştir.





Şekil 4. Çalışma alanı çevresi deprem bilgilendirme haritası (<https://tadas.afad.gov.tr/station-detail>)

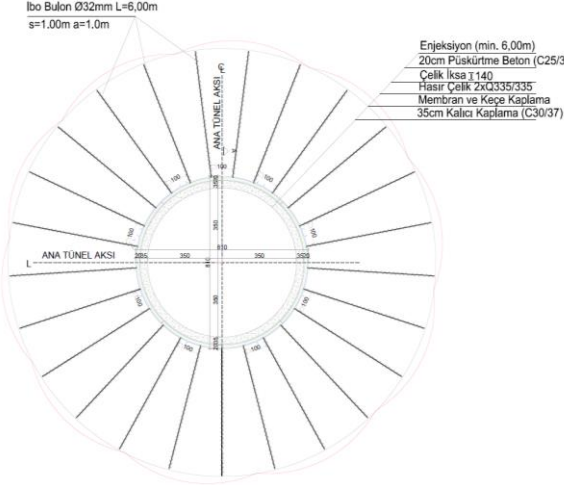
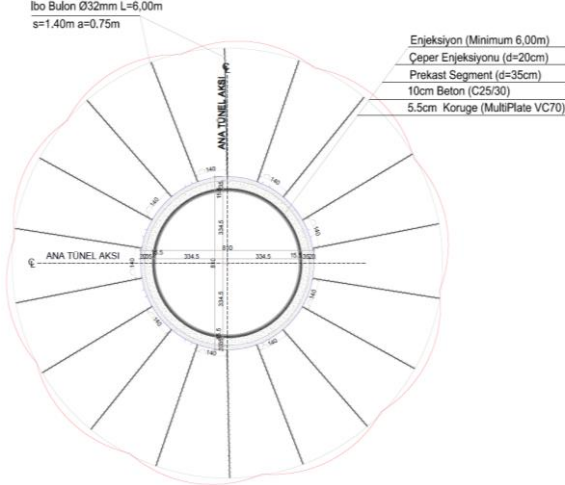
2. ONARIM YÖNTEMLERİ

Hasar tespit edilen Km: 11+688 – Km: 13+146 arasındaki segmentlerde, hasarın niteliğine göre segment onarım kesitleri belirlenmiştir. Segment üzerinde derin çatlaklar, donatıların açığa çıkması gibi segmentin taşıma kapasitesini kaybettiği durumlar için, "Tip-1" olarak adlandırılan onarım yöntemi geliştirilmiş olup, bu yöntem kapsamında segmentlerin sökülmesi ve yerine püskürtme beton ile kalıcı kaplama uygulanarak NATM yöntemine göre onarım sistemi tasarlanmıştır. Taşıma kapasitesini etkilemeyen yüzeysel çatlaklar ve kavlamalar gibi hasarların bulunduğu bölgeler için ise mevcut segmentin çelik koruge kaplama ile desteklenmesi esas alınarak tasarım yapılmıştır.

Tüm onarım sistemlerinde, tünelin dış çeperinden itibaren 6,00 m kalınlığında enjeksiyon uygulanarak zeminin güçlendirilmesi sağlanmış ve plastikleşme bölgesinde yer alan birimin stabilitesi artırılmıştır. Ayrıca, segmentlerin bulonlanması ile onarım imalatları esnasında güvenli bir çalışma alanı oluşturulmuştur. Tünel çevresindeki enjeksiyon ile güçlendirilmiş birimin, bulon sıyrılma kapasitesine olan etkisi dikkate alınarak, bulon boyları enjeksiyonlu bölge içerisinde kalacak şekilde tasarlanmıştır.



Tablo 2. Onarım tip kesitleri ve imalat aşamaları (Progeo,2023)

| Tip-1 NATM Onarım Sistemi | Tip-2 TBM-Epoksi Kaplamalı Ondüle Plakalı Çelik koruge Onarım Sistemi |
|---|--|
|  <p>Ibo Bulon Ø32mm L=6,00m s=1,00m a=1,0m</p> <p>Enjeksiyon (min. 6,00m) 20cm Püskürtme Beton (C25/31) Çelik İksa T 140 Hasır Çelik 2xQ335/335 Membran ve Keçe Kaplama 35cm Kalıcı Kaplama (C30/37)</p> |  <p>Ibo Bulon Ø32mm L=6,00m s=1,40m a=0,75m</p> <p>Enjeksiyon (Minimum 6,00m) Çeper Enjeksiyonu (d=20cm) Prekast Segment (d=35cm) 10cm Beton (C25/30) 5.5cm Koruge (MultiPlate VC70)</p> |
| <ul style="list-style-type: none"> - İmalatı tamamlanan TBM segmentleri sökülmeden önce ani göçmeleri önleme adına radyal olarak 6,00 çapında s/ç oranı 1/1 olan konsolidasyon enjeksiyonunun yapılması. - Segmentlerin söküleceği bölgelerin ilerisindeki ve gerisindeki segmentlerin IBO Bulon ile sabitlenmesi, - TBM segmentlerinin üst yarısının sökülmesi, üst yarı bulonlarının ve püskürtme betonun imalatının tamamlanması. - TBM segmentlerinin alt yarısının sökülmesi, alt yarı bulonlarının ve püskürtme betonun imalatının tamamlanması. - Alt yarı ve üst yarı kalıcı kaplama imalatının tamamlanması | <ul style="list-style-type: none"> - Sökülmeyecek segmentlerin arkasında destek amaçlı radyal olarak 6,00m çapında s/c oranı 1/1 olan enjeksiyon yapılması - Segmentlerin IBO Bulon ile sabitlenmesi, - Segmentlerin önüne doğrudan 10cm beton kaplama ve Epoksi kaplamalı ondüle plakalı Çelik koruge tasarımının imalatı yapılması, |

3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZLER

Söz konusu onarımlar, Km: 11+688,90 - Km: 13+146,80 arasında yer alan segmentlerde gerçekleştirilecektir. Hasar durumlarına göre belirlenen onarım tasarımı, ilgili kilometreler arasında kalan en yüksek örtü yüksekliğine sahip kesitler analiz kesiti olarak belirlenmiştir.

İki tip onarım için yapılan analizler, sahada gerçekleştirilecek imalat aşamalarına uygun şekilde modellenmiştir. Tüm analizler sonucunda elde edilen kesit tesirleri, ilgili taşıyıcı elemanların kapasite diyagramları oluşturularak kontrol edilmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan modeller sonucunda elde edilen analiz sonuçları, destekleme elemanları üzerine gelen Maksimum Moment, Maksimum basınç kuvveti ve Maksimum çekme kuvveti değerleri ve bunlara karşılık gelen eksenel kuvvet ve moment değerleri belirlenmiştir. Analiz sonucunda elde edilen bu değerler statik ve dinamik durum için 1,6 ve 1,1 güvenlik sayıları arttırılarak tasarım değerlendirilmesi yapılmıştır.

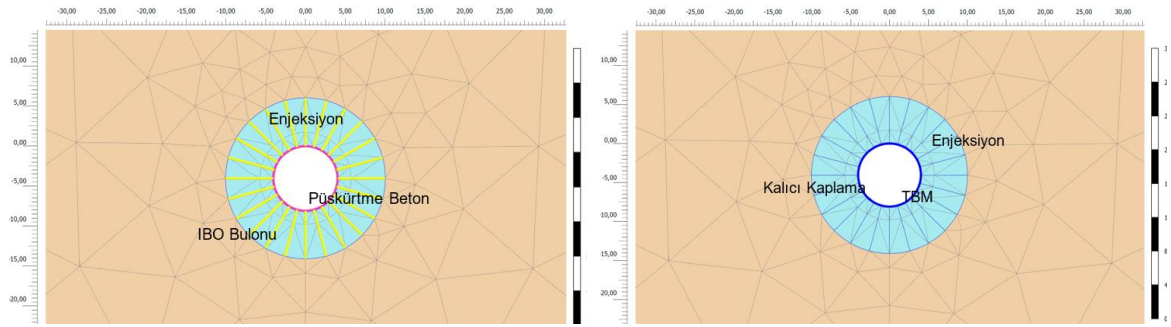


3.1. Tip-1 NATM Onarım Sistemi

Tünel güzergahında, Km: 11+786,60 - 11+840,70, Km: 12+072,20 - 12+126,30 ve Km: 12+199,90 - 12+296,10 arasında kalan segmentlerde, segmentlerin taşıma kapasitesini olumsuz etkileyecek hasarların olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, belirtilen kilometre aralıklarında segmentlerin sökülerek yerlerine NATM yöntemiyle yeni tünel kesitinin tasarlanmasına karar verilmiştir. Tünel çeperinde enjeksiyon yöntemi ile zemin güçlendirmesi yapıldıktan sonra uygulanacak olan geçici ve kalıcı kesit detayları Tablo 1.1'de sunulmuştur. İlgili tasarım sonlu elemanlar yöntemli bilgisayar programı ile analiz edilmiştir. Geçici ve kalıcı kaplama için analiz durumları şekil.1'de verilmiştir

Tablo 3. Tip-1 TBM onarım detayları (Progeo, 2023)

| Kazı | Atım Boyu | m | 1,00 |
|-----------------|---------------|----|------------|
| Püskürtme Beton | Kalınlık | mm | 200 |
| | Beton Cinsi | - | C20/25 |
| İksa | Çelik Kuşak | - | IPE140 |
| | Hasır Çelik | - | 2xQ335/335 |
| Bulon | Cinsi | - | R32N |
| | Boy | m | 6,00 |
| | Round Boyu | m | 1,00 |
| | Bulon Aralığı | m | 1,00 |
| Kalıcı Kaplama | Kalınlık | cm | 40,00 |
| | Beton Sınıfı | - | C35 |
| | Donatı | - | - |



Şekil 5. Tip-1 onarım sistemi analiz kesitleri (Progeo, 2023)

Analizler sonucunda püskürtme beton, kalıcı kaplama üzerinde oluşacak kesit tesirleri belirlenmiştir. (Tablo 4. Tablo 5. Tablo 6.)

Tablo 4. Geçici kaplama analiz sonuçları (Progeo, 2023)

| Analiz Durumu | N* (kN/m) | M* (kNm/m) | N _{tasarım} (kN/m) | M _{tasarım} (kNm/m) | V _{max} (kN/m) |
|---------------|-----------|------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------|
| Statik | -1796,94 | -33,36 | -2156,33 | -40,03 | 154,32 |
| | -880,87 | -20,14 | -1057,04 | -24,17 | |
| | -876,69 | 17,68 | -1052,03 | 21,22 | |



Tablo 5. IBO Bulonu Aksenal Kuvvet Değerleri (Progeo, 2023)

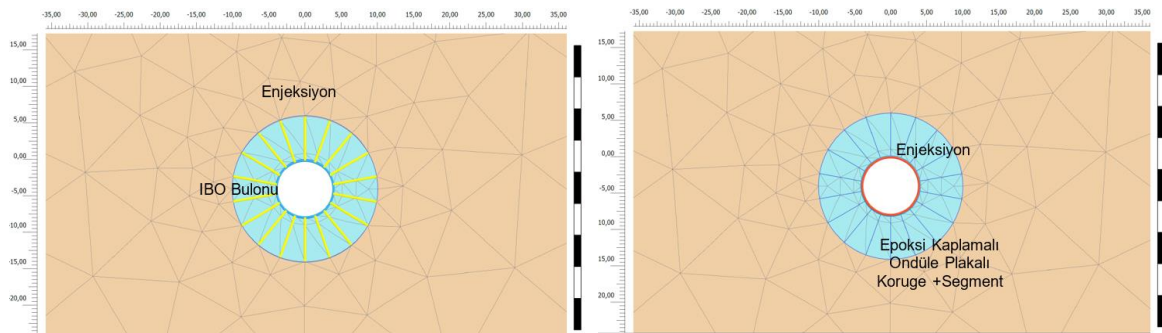
| | N _{bulon} (kN/m) | N _{tasarım} (kN) |
|------------|------------------------------|------------------------------|
| Destekleme | 117,0 | 140,40 |

Tablo 6. Kalıcı kaplama analiz sonuçları (Progeo, 2023)

| Analiz Durumu | N* (kN/m) | M* (kNm/m) | N _{tasarım} (kN/m) | M _{tasarım} (kNm/m) | V _{max} (kN/m) |
|---------------|--------------|---------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Statik | -2221,70 | -27,59 | -3268,27 | -50,16 | 58,00 |
| | -1048,72 | -79,96 | -1581,31 | -136,34 | |
| | -976,67 | 37,78 | -1378,27 | 113,28 | |
| +Eqx | -2221,87 | -38,99 | -2315,71 | -37,68 | 58,00 |
| | -1048,72 | -79,96 | -1087,15 | -93,73 | |
| | -1146,37 | 42,87 | -1081,65 | 82,84 | |
| +Eqy | -5041,10 | -97,23 | -4560,62 | -45,34 | 75,00 |
| | -5097,03 | -96,28 | -4159,76 | -94,02 | |
| | -4772,99 | 37,78 | -4259,52 | 77,88 | |

3.2. Tip-2 TBM-Epoksi Kaplamalı Ondüle Plakalı Çelik koruge Onarım Sistemi

Km: 11+688,90 - 11+785,10, Km: 11+842,20 - 12+070,60, Km: 12+127,80 - 12+198,40, Km: 12+297,60 - 12+865,70, Km: 12+966,40 - 12+974,00, Km: 13+101,70 - 13+146,80 aralıklarında arasında kalan segmentlerde, segmentlerin taşıma kapasitesini olumsuz etkilemeyecek hasarların olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle mevcut segmentlerin sökülmeden taşıma kapasitesi destek olması amacıyla epoksi kaplamalı ondüle plakalı çelik koruge ile mevcut yapının güçlendirilmesi karar verilmiştir.



Şekil 6. Tip-2 onarım sistemi analiz kesitleri (Progeo, 2023)

Tünel çeperinde enjeksiyon yöntemi ile zemin güçlendirmesi yapıldıktan sonra mevcut segmentler bulonlar ile desteklenecek, çelik koruge imalatı ile onarım sistemi tamamlanacaktır. İlgili tasarım sonlu elemanlar yöntemli bilgisayar programı ile analiz edilmiştir. Analizler sonucunda mevcut segment ve çelik koruge üzerinde oluşacak kesit tesirleri belirlenmiştir. (Tablo 7. Tablo 8. Tablo 9.)



Tablo 7. Mevcut segmentlere ait kesit tesirleri (Progeo, 2023)

| Analiz Durumu | N* (kN/m) | M* (kNm/m) | N _{tasarım} (kN/m) | M _{tasarım} (kNm/m) | V _{max} (kN/m) |
|---------------|--------------|---------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Statik | -3984,00 | -39,73 | -6374,40 | -63,57 | |
| | -3640,00 | -98,68 | -5824,00 | -157,89 | 61,00 |
| | -3686,00 | 65,50 | -5897,60 | 104,80 | |
| +Eqx | -4270,99 | -18,32 | -4698,09 | -20,15 | |
| | -3640,00 | -107,71 | -4004,00 | -118,48 | 61,00 |
| | -3784,00 | 74,58 | -4162,40 | 82,04 | |
| +Eqy | -8724,00 | -165,00 | -9596,40 | -181,50 | |
| | -8690,00 | -195,00 | -9559,00 | -214,50 | 63,00 |
| | -6244,00 | 86,00 | -6868,40 | 94,60 | |

Tablo 8. IBO Bulonu Eksenel Kuvvet Değerleri (Progeo, 2023)

| | N _{bulon} (kN/m) | N _{tasarım} (kN) |
|------------|---------------------------|---------------------------|
| Destekleme | 15,52 | 18,62 |

Tablo 9. Çelik koruge kaplamaya ait kesit tesirleri (Progeo, 2023)

| Analiz Durumu | N* (kN/m) | M* (kNm/m) | V _{max} (kN/m) |
|---------------|-----------|------------|-------------------------|
| Statik | -141,50 | -0,22 | |
| | -141,50 | -0,22 | -0,83 |
| | 14,72 | 0,25 | |
| +Eqx | -235,00 | -0,17 | |
| | -57,60 | -0,32 | -1,60 |
| | 78,56 | 0,51 | |
| +Eqy | -1765,00 | -0,13 | |
| | -1765,00 | -0,13 | -2,30 |
| | -410,50 | 0,75 | |

Analizler sonucunda elde edilen tüm veriler, ilgili kesitlerin taşıma kapasiteleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelere göre, kesitlerin yeterli olduğu tespit edilmiştir. Bulonlar üzerinde oluşması beklenen çekme kuvvetleri, bulonların kapasitesine göre analiz edilmiş ve tasarımlar buna uygun olarak yapılmıştır. Bulon sistemi geçici bir destek elemanı olarak tasarlanmış olup, ani deformasyonları engellemek amacıyla projelendirilmiştir. Ancak, uzun vadede korozyon riski taşıdıkları için kalıcı sistem analizlerinde dikkate alınmamışlardır.

4. ONARIM SİSTEMİ UYGULAMASI VE SONUÇLARI

6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen deprem sonrasında Bahçe-Nurdağı T2 Tüneli'nde oluşan hasarlar için tasarlanan onarım sistemi, sonlu elemanlar analizi ile modellenmiş ve bu doğrultuda destek elemanları üzerindeki kesit tesirleri, elemanların taşıma kapasiteleri göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Yapılan analizler neticesinde, tasarlanan onarım sisteminin oluşan tesirleri karşılama açısından yeterli olduğu belirlenmiştir.



Tip-1 onarım yöntemi, TBM segmentlerinin yerinden sökölmesi ve yerlerine NATM yöntemi ile yeni bir tünelin inşa edilmesi esasına dayanmıştır. Bu onarımın tamamlanmasıyla, tünel iki farklı tünel açma yönteminin (TBM ve NATM) bir arada kullanıldığı bir yapıya dönüşmüştür. Tasarımın temel önceliği, bu iki farklı yöntemin uyumlu bir şekilde çalışmasını sağlamak ve tünel stabilitesini olumsuz etkilememektir. Segmentlerin sökölmesi ve yeni kaplama elemanlarının yerleştirilmesi bu bağlamda kritik bir öneme sahiptir. Bu nedenle, uygulama sırasında imalat aşamalarına dikkat edilmesi gerekmektedir.

Tip-2 onarım yöntemi ise, taşıma kapasitesini olumsuz etkilemeyecek seviyede hasar gören segmentlerin sökölmeden güçlendirilmesini kapsamaktadır. Bu yöntem, mevcut segmentlerin iç kısmına epoksi kaplamalı ondüle plakalı çelik koruge yerleştirilmesi suretiyle yapılmıştır ve böylece yapı taşıma kapasitesine destek sağlanmıştır.

Tasarımın güvenli bir şekilde uygulanabilmesi için kritik öneme sahip bazı hususlar bulunmaktadır. İmalat aşamalarında izlenen tüm adımlar, bir önceki adımın nihai taşıma kapasitesine ulaşmasının ardından sürdürülmelidir. Özellikle segment sökümü sırasında, güvenliğin sağlanması adına söküm işlemi her bir ano için ayrı ayrı yapılmalı ve söküm öncesinde çelik iksa ile destekleme, iş güvenliği açısından zorunludur. Ayrıca, sökülecek segmentlerin önünde ve arkasında yer alan segmentlerin sabitlenmesi, söküm yapılan bölgeye doğru olası kapanmaları engelleyecektir. İmalat sürecine tam uyum, hem iş sağlığı ve güvenliği hem de tünel stabilitesinin korunması açısından büyük önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, Bahçe-Nurdağı Tüneli'nin, ülkemiz için önemli bir ulaşım bağlantısı olarak yapı ömrü boyunca güvenli ve verimli bir hizmet sunması, tasarımın güvenilirliği ve inşaat kalitesine bağlıdır. Bu kapsamda, geliştirilen onarım sistemi, tünelin uzun vadeli performansını sağlamak adına kritik bir rol oynamaktadır.

KAYNAKLAR

Deprem Tehlike Haritaları, İnteraktif Web Uygulaması, <https://tdth.afad.gov.tr/main.xhtml> (2020).

Emre, Ö. Duman, T.Y., Olgun, Ş., Elmacı, H. Ve Özalp, S., 2012, 1:250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, Gaziantep (NJ 37-9) Paftası, Seri No: 38, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara - Türkiye

Fugro Sial Yerbilimleri Müş. ve Müh. LTD. ŞTi, 2014, Bahçe – Nurdağı Geçiş Tüneli (Km: 03+653.12 – Km: 13+450) Jeolojik - Jeoteknik Proje Raporu

Progeo Proje Müş. ve Müh. LTD. ŞTi, 2023, Bahçe – Nurdağı Tüneli (Km: 11+688 – Km: 13+146) TBM Onarım Projesi Jeolojik - Jeoteknik Hesap Raporu

SEMBOL LİSTESİ

| | | | |
|-----|---------------------|-------|---|
| TBM | Tünel açma makinesi | TADAS | Türkiye ivme veritabanı ve analiz sistemi |
| PGA | En büyük yer ivmesi | MTA | Maden Teknik Arama |

