

NATM TÜNEL KAZILARINDA YÜK AZALTMA YÖNTEMİ KATSAYISI DEĞİŞİMİNİN DEFORMASYONLARA ETKİSİ

EFFECT OF CHANGE IN CONVERGENCE-CONFINEMENT METHOD COEFFICIENT ON DEFORMATIONS IN NATM TUNNEL EXCAVATIONS

Yusuf KAYA¹

ÖZET

Günümüzde farklı ulaşım seçeneklerine olan talep artışı tünel inşaatlarının da geçmişe kıyasla artmasına neden olmuştur. Tünel kazıları zemin yapısı, jeolojik formasyon ve maliyet gibi etkenlere bağlı olarak çeşitli yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Tünel kazı ve kazı destekleme sistemlerinin tasarımında sayısal yöntemlerin kullanılması kazı ve çevre yapıların güvenliğinin sağlanması açısından oldukça önemlidir. Sayısal analizlerde tünel kazısı kaynaklı deformasyon ve gerilmelerin incelenmesi için üç boyutlu sayısal modellerin kullanılması daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Ancak üç boyutlu modeller için fazla sayıda parametre gerekmesi zaman ve maliyet bakımından daha kullanışlı olan iki boyutlu analizlere yönelim oluşturmuştur. Bu kapsamda iki boyutlu analizlerin hesap doğruluğunun artırılması için üç boyut etkisini hesaba katacak çalışmalar literatürde geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında bahsedilen yöntemlerden biri olan yük azaltma yöntemi (Convergence-Confinement Method, Konverjans Sınırlama yöntemi veya β metodu) kullanılarak Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) ile açılan bir tünel kazısı sayısal olarak iki boyutlu modellenmiştir. Yapılan modellemelerde farklı $(1 - \beta)$ parametresi için %20, %30, %40, %50, %60 ve %70 değerleri kullanılarak farklı yük azaltma katsayılarının tünel kazısı kaynaklı yüzey deformasyonlarına olan etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında optimum bir yük azaltma katsayısı elde edilmeye çalışılarak yönetmeliklerde tasarım için önerilen değer aralıklarıyla fark ve benzerlikleri ortaya konulmuştur. Ek olarak tünel kazısının yapıldığı tünel yüzeyinde sürşarj yükleri olması durumları da ayrıca irdelenmiştir. Buna göre zemin yüzeyinde 10, 15 ve 20 kPa değerlerinde kalıcı yükler olması halinde $(1 - \beta)$ parametresi değerinin 10, 30, 60 ve 80 olması durumlarında oluşan yüzey düşey deformasyonları kendi içerisinde karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tünel, Deformasyon, NATM, Sayısal analiz, β metodu

ABSTRACT

Nowadays, the increase in demand for different transportation options has led to an increase in tunnel construction compared to the past. Tunnel excavations are carried out using various methods depending on factors such as soil structure, geological formation and cost. The use of numerical methods in the design of tunnel excavation and excavation support systems is very important in terms of ensuring the safety of excavation and surrounding structures. The use of three-dimensional numerical models to examine the deformation and stresses caused by tunnel excavation in numerical analysis gives more realistic results. However, the need for a large number of parameters for three-dimensional models has led to two-dimensional analyzes, which are more useful in terms of time and cost. In this context, studies to take into account the three-dimensional effect have been developed in the literature in order to increase the accuracy

¹ Araştırma Görevlisi, İstanbul Beykent Üniversitesi, yusufkyya@gmail.com

of two-dimensional analyzes. A tunnel excavation dug with the New Austrian Tunneling Method (NATM) was numerically modeled in two dimensions by using the load reduction method (Convergence-Confinement Method, Convergence Limitation method or β method), which is one of the methods mentioned in this study. In the modeling, the effects of different load reduction coefficients on the surface deformation caused by tunnel excavation were examined comparatively by using the values of 20%, 30%, 40%, 50%, 60% and 70% for the different $(1-\beta)$ parameters. With the results obtained, an optimum load reduction coefficient was tried to be obtained, and the differences and similarities with the value ranges recommended for the design in the regulations were revealed. In addition, the situations of surcharge loads on the tunnel surface where the tunnel excavation is carried out were also examined. Accordingly, in case of permanent loads of 10, 15 and 20 kPa on the ground surface, the surface vertical deformations that occurred when the $(1-\beta)$ parameter value was 10, 30, 60 and 80 were evaluated comparatively.

Keywords: Tunnel, Deformation, NATM, Numerical analysis, β method

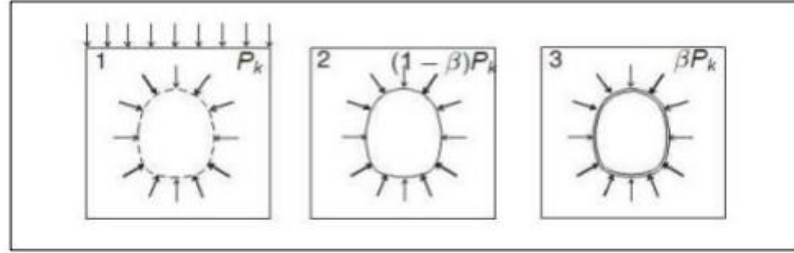
1. GİRİŞ

Artan nüfus yoğunluğu yer üstünün olduğu gibi yer altının da etkili olarak kullanılması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu kapsamda çeşitli amaçlarla inşa edilen tünellere yönelim artmıştır. Günümüzde tüneller karayolu, demiryolu gibi ulaştırma alanlarında, su getirme elemanı olarak hidrolik yapılarda, gerektiğinde ise barınma veya depolama gibi farklı faaliyet alanlarında kullanılmak üzere imal edilmektedirler. Yer altı mühendislik yapısı olan tüneller zemin yapısı, jeolojik formasyon ve ekonomik etkenlere bağlı olarak farklı yöntemler kullanılarak kazılabilmektedir. Bu yöntemlerden bir tanesi günümüzde sıklıkla başvuru Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) adlı yöntemdir. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi'nde temel prensip tünelin açıldığı kaya ortamına kendi kendini taşıma ilkesidir (Vardar, 1979). Bu sistem gerekli tahkimat elemanları ile desteklenerek oluşması muhtemel ikincil gerilmelere karşı ortam stabilitesi sağlanılmaya çalışılır.

Tünel inşaatlarının gerçekleştirilmesinden önce saha çalışmaları ve sayısal analizlerin yapılması mevcut yapı ve çevre yapıların güvenliği için büyük önem arz etmektedir. Tünel kazısı kaynaklı oluşabilecek deformasyonların önceden hesaplanması için yaygın olarak kullanılan sayısal analizlerde üç boyutlu modeller kurulması daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Ancak üç boyutlu modellemeler için çok fazla sayıda parametre gerekmesi zaman ve maliyet bakımından daha avantajlı olan iki boyutlu modellere yönelim oluşturmuştur. İki boyutlu modellemelerin hesap doğruluğunun artırılması için üç boyut etkisini analizlere katacak yöntemlerin kullanılması gereklidir. Bu yöntemlerden bir tanesi olan yük azaltma yöntemi (Convergence-Confinement Method, Konverjans Sınırlama Yöntemi, β Metot) yaygın olarak günümüzde kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında bahsedilen yöntemin deformasyonlara etkisi irdelenmiştir.

2. YÜK AZALTMA YÖNTEMİ (CONVERGENCE-CONFINEMENT METHOD)

Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi kullanılarak açılacak tünellerin iki boyutlu olarak modellenmesi sonucu deformasyonların tahmin edilmesine yönelik Panet ve Guenot (1982) tarafından yük azaltma yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem β olarak temsil edilen tek bir parametreye bağlı olduğu için diğer yöntemlere nazaran daha sık kullanılmaktadır. Bahsedilen β parametresi tünel kazısı kaynaklı gerilme değerlerinin tünel kazısı ile kaplama tahkimatı arasında geçen sürede gevşeme yüzdesini ifade etmektedir. Uygulamada NATM kullanılırken kazıdan sonra kayanın gevşeyip gerilmelerin dağılması için bir süre beklenilmektedir. Böylelikle kazı çevresinde uygulanacak tahkimat elemanına gelecek yük azaltılmış olmaktadır. Yöntemin çalışma prensibi Şekil 1'de gösterilmiştir. Tasarımda β parametresinin seçilmesi uygulama tecrübesine ve desteksiz kazılan tünel uzunluğuna bağlı olsa da FHWA (Federal Karayolları İdaresi) tarafından %30-%60 aralığında alınması tasarımcılara önerilmektedir.



Şekil 1. β yöntemi uygulanma prensibi (Brinkgreve vd., 2018)

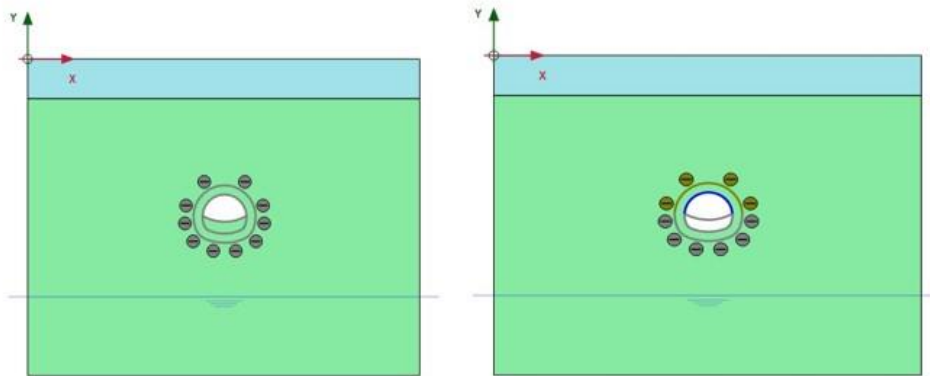
3. SAYISAL ANALİZLER

Bu çalışma kapsamında Yeni Avusturya Tünel Açma (NATM) yöntemi kullanılarak kazısı yapılan bir tünel inşaatı sonlu elemanlar hesap yöntemi esaslı PLAXIS 2D paket yazılımında modellenmiştir. Modellemede kullanılan zemin ve kaya parametreleri malzeme modellerine göre Tablo 1’de verilmiştir. Zemin profili 10 metre siltli kumlu kilden devamında ise kum taşı formasyonundan oluşmaktadır.

Tablo 1. Malzeme parametreleri (Khabbaz vd., 2019)

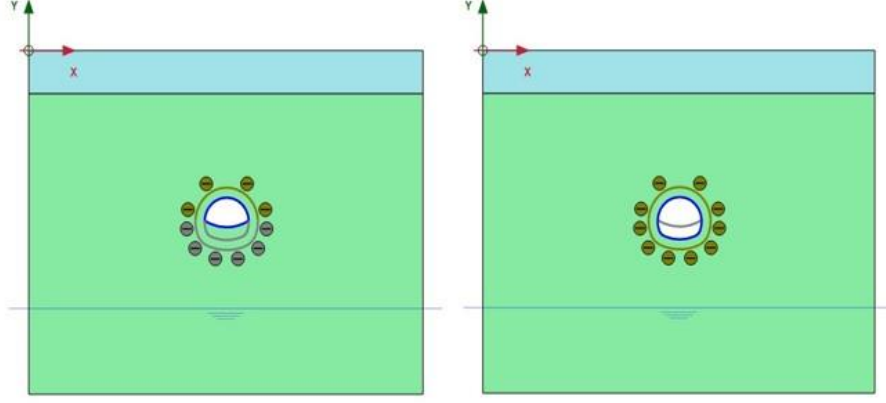
Parametre	Birim	Mohr-Columb	Hoek-Brown
Birim Hacim Ağırlık	kN/m ³	20	24
Elastisite Modülü	kN/m ²	3x10 ³	3x10 ⁵
Poisson Oranı	-	0,3	0,2
Kohezyon	kN/m ²	20	-
İçsel Sürtünme Açısı	°	30	-
Tek Eksenli Basınç Mukavemeti	kN/m ²	-	25x10 ³
Som (intact) Kaya Katsayısı	-	-	17
Jeolojik Dayanım İndeksi	-	-	50
Örselenme Faktörü	-	-	0

Tünel kazısı başlangıç aşaması dışında 4 fazdan oluşan kademeli inşaat olarak modellenmiştir. Yük azaltma katsayısının uygulandığı kazı inşa aşamaları Şekil 2’de verilmiştir.



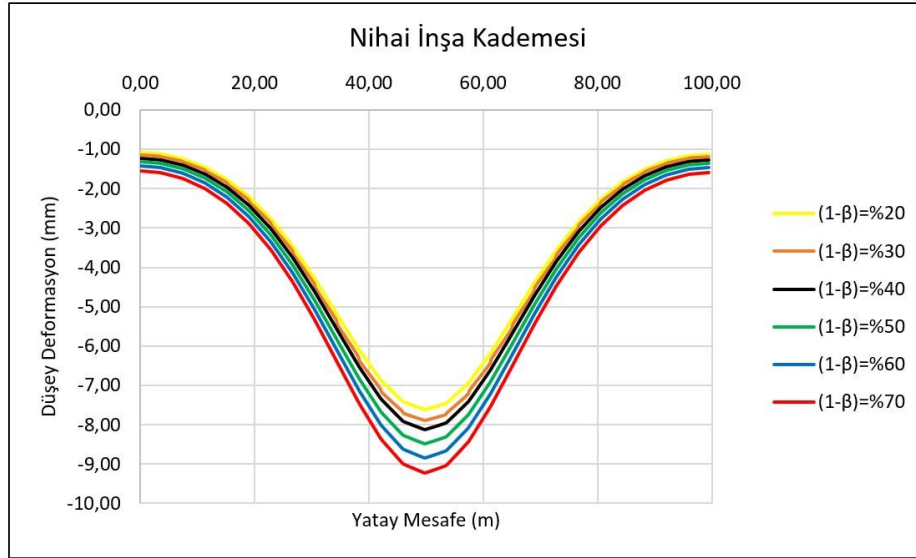
Şekil 2. Üst ve alt yarı kazı aşamaları

Tünel kazılarına takiben uygulanan üst ve alt tahkimat adımları Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Üst ve alt yarı tünel tahkimat aşamaları

Yapılan modellemede tünel üst ve alt yarı kazılarının gerçekleştirildiği 1. ve 3. kademe inşaat aşamalarında yük azaltma katsayısı $(1-\beta)$ değerleri %20, %30, %40, %50, %60, %70 olarak farklı değerlerde girilmiştir. Tünel üst ve alt kaplama yerleştirme işlemlerinin yapıldığı 2. ve 4. kademe inşaat aşamalarında ise yük azaltma katsayısı $(1-\beta)$ değerleri %100'e tamamlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda nihai inşaat kademeleri için farklı yük azaltma katsayılarında oluşan yüzey deformasyonları Şekil 4'de verilmiştir.

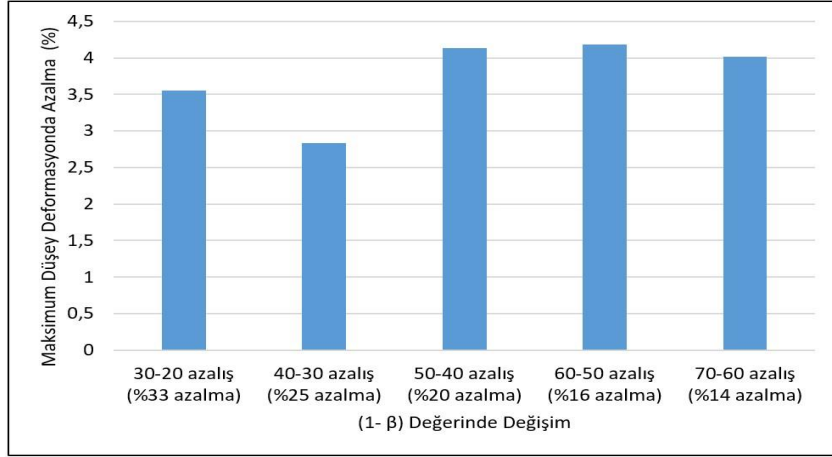


Şekil 4. Birincil inş kademesi düşey deformasyonlar

Farklı yük azaltma katsayıları ile yapılan analizler neticesinde oluşan maksimum yüzey deformasyonu değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

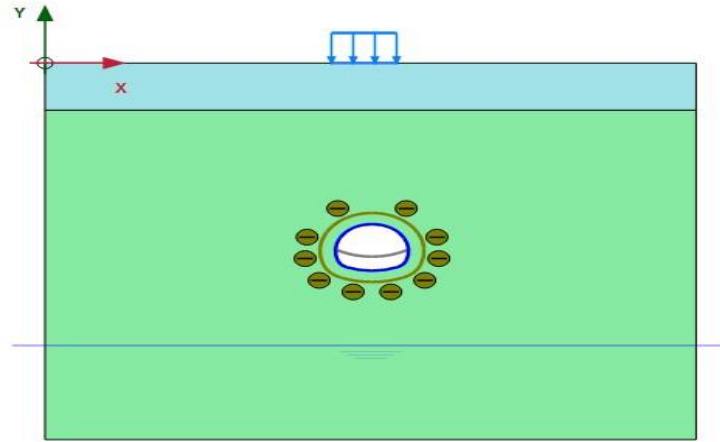
Tablo 2. Maksimum düşey deformasyon değerleri	
$(1-\beta)$ Değeri	Maksimum Düşey Deformasyon (mm)
%20	-7,61
%30	-7,89
%40	-8,12
%50	-8,47
%60	-8,84
%70	-9,21

Elde edilen maksimum yüzey düşey deformasyonlarındaki yüzdesel azalma miktarları $(1-\beta)$ parametresindeki değişimlere göre Şekil 5'te verilmiştir.



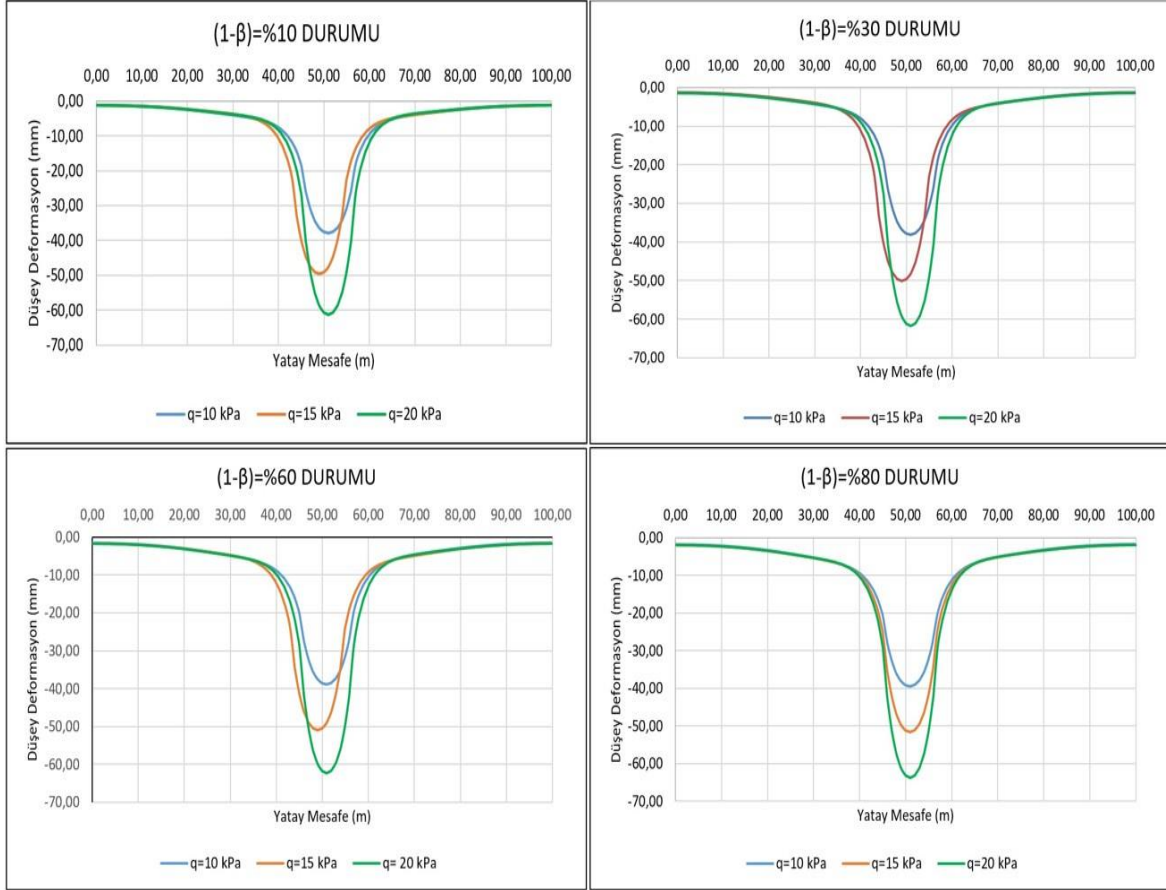
Şekil 5. Maksimum düşey deformasyonlarda yüzdesel azalış değerleri

Tünel kazısı yapılan güzergahta zemin yüzeyinde kalıcı sürşarj yüklerinin olması durumunda farklı (1-β) katsayısı için sayısal analizler yapılmıştır. Buna göre yüzeyde 10, 15 ve 20 kPa değerinde sürşarj olması durumunda (1-β) katsayısının %10, %30, %60 ve %80 değerleri için yüzeyde oluşan düşey deformasyon sonuçları elde edilmiştir. Yüzeyde 10 m boyunca sürşarj yüklemesinin uygulandığı konum görseli Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Yüzeyde sürşarj yüklemesi durumu

(1-β) değerinin %10, %30, %60 ve %80 olması halinde farklı sürşarj yükleri için oluşan düşey deformasyonlar Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Farklı sürşarj yüklemeleri için düşey deformasyonlar

4. SONUÇLAR

Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) kullanılarak kazısı gerçekleştirilecek tünellerin iki boyutlu modellenmesi esnasında üç boyut etkisinin hesaba katılması için analizler esnasında yaygın olarak Yük Azaltma Katsayısı metodu (β metodu, Convergence-Confinement Method) kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında farklı yük azaltma katsayısı değerleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler neticesinde yüzeyde oluşan düşey deformasyon değerleri incelenmiştir. Bu kapsamda artan $(1-\beta)$ değerleri yüzeyde oluşan düşey deformasyon değerlerinde artışa neden olmuştur. Düşük $(1-\beta)$ değerlerinde daha az deformasyon çıkmasının nedeni tünel açılan ortamın gevşemesine daha az müsaade edilmesidir. Örneğin %20 $(1-\beta)$ değeri için kazı kaynaklı oluşan ikincil gerilmelerin %20 oranında azalması kalan %80'lik gerilme değerinin ise tünel tahkimatı tarafından karşılanacağı varsayılmaktadır.

Kazı neticesinde oluşması muhtemel düşey deformasyonlar maksimum değerlerine tünel ekseninde ulaşırken tünel ekseninden yatayda uzaklaştıkça deformasyon değerleri azalarak sıfırlanmaktadır. Elde edilen maksimum oturma değerleri ile $(1-\beta)$ katsayılarının ilişkisi ayrıca incelenmiştir. Bu kapsamda en düşük $(1-\beta)$ değerinde oluşan maksimum düşey deformasyon 7,61 mm olurken en yüksek $(1-\beta)$ değerinde ise 9,21 mm olmuştur. $(1-\beta)$ parametre değeri %71,42 azalırken düşey deformasyon değeri ise %17 oranında azalmaktadır. Yük azaltma katsayısının %20 olduğu durumunda kaya ortamın rahatlamasına daha az izin verildiği için maksimum oturma diğer durumlara göre düşük çıkarken tünel kaplamasında oluşan maksimum pozitif moment değeri ise 7,68 kN.m değeri ile en yüksektir. Yük azaltma katsayısının %70 olduğu durumda ise kaya ortamının daha fazla gevşemesine izin verildiği için daha yüksek maksimum oturma değeri çıkarken kaplamada oluşan maksimum pozitif moment değeri ise 1,33 kN.m değeri ile en düşüktür.

Yük azaltma katsayısının seçiminde deneyim ve desteksiz kazılan tünel uzunluğu etkili parametreler olsa dahi FWA tarafından tasarımda %30-%60 değerleri arasında kalınması önerilmektedir. Yapılan bu çalışmada elde edilen değerler neticesinde optimal yük azaltma katsayısının FWA tarafından önerilen aralıkta kaldığı

görülmüştür. Bunun yanında tünel güzergahının yapılaşmaya uzak kesimlerinde ve yüzey deformasyonlarında izin verilebilir miktarların yüksek olması durumunda yük azaltma katsayısının yüksek seçilmesi tünel tahkimat maliyetlerini düşürecektir.

Ek olarak tünelin açılmış olduğu zeminin yüzeyinde 10 metre genişliğinde kalıcı sürşarj uygulanması durumunda farklı yük azaltma katsayıları için farklı sürşarj yüklerinde sayısal analizler yapılmıştır. Yapılan analizler neticesinde yük azaltma katsayısının %10, %30, %60 ve %80 olması durumlarının her birinde en yüksek düşey yer değiştirmeler sürşarj yükünün en fazla olduğu değerde olmuştur. Buna göre sürşarj yüklemesinin artışı düşey deformasyonları da arttırmıştır. $(1-\beta)$ parametresinin sırasıyla %10, %30, %60 ve %80 olduğu durumlar için sürşarj yüklemesi %100 artarsa düşey deformasyonlar sırasıyla %62.5, %62.3, %60.2 ve %61.5 artmaktadır. Düşey deformasyon artış yüzdelerinin yakın olması farklı yük azaltma katsayılarında olsa dahi sürşarj etkisinin oransal olarak sonuçları benzer etkilediğini göstermektedir. Ayrıca ortam gevşemesine en çok imkân verilen $(1-\beta)$ değerinin %80 olduğu durumda ve sürşarj değerinin en yüksek olduğu 20 kPa durumda en yüksek maksimum düşey deformasyon değeri olan 63,66 mm değerine ulaşılmıştır. Ortamın en az gevşemesine müsaade edilen $(1-\beta)$ değerinin %10 olduğu ve sürşarj değerinin en düşük olduğu 10 kPa durumunda en düşük maksimum düşey deformasyon değeri olan 37,75 mm değerine erişilmiştir.

KAYNAKLAR

- Brinkgreve, R.B., Kumarswamy, S., Swolfs, W.M., Zampich, L. ve Ragi, M. (2018), "Plaxis 2D Reference Manual", Hollanda, Plaxis BV, 303-304.
- FHWA, (2009), Technical Manual For Design and Construction of Road Tunnels-Civil Elements, National Highway Institute.
- Khabbaz, H., Gibson, R., & Fatahi, B. (2019), "Effect of Constructing Twin Tunnels Under a Building Supported by Pile Foundations in the Sdney Central Business District", Underground Space, 261-276.
- Panet, M., & Guenot, A. (1982), "Analysis of Convergence Behind The Face of a Tunnel", The 3rd International Symposium, London, Institute of Mining and Metallurgy, 197-204.
- Vardar, M. (1979), "Mühendislik Jeolojisi-Yer Altı Kaya Mekaniği İlişkisi", DSİ 6. mühendislik Jeolojisi Sempozyumu, Ankara.