

**T.C.**  
**BİLECİK ŐEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**  
**BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJESİ**  
**SONUÇ RAPORU**

**AŞIRI KONSOLIDASYON ORANI FARKLI KİL**  
**ZEMİNLERDE TÜNEL DEFORMASYONLARININ**  
**SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ**

**PROJE YÜRÜTÜCÜSÜ: Doç. Dr. Nazile URAL**

**PROJE NOSU: 2017-02.BŐEÜ.03-02**

**ARAŞTIRMACI: Burak GÖRGÜN**

**Sonuç Rapor Dönemi Tarihi:08.05.2019**

**BİLECİK ŐEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**  
**BİLECİK, 2019**

## **Özet**

Sın yıllarda ülkemiz, ekonomik ve teknik anlamda gelişmeler göstererek gelişmiş ülkeler arasında yer almaya başlamıştır. Bu ekonomik gelişmelerin sonucu sanayi, ulaştırma, iletişim ve benzeri alanlarda büyük projeler gerçekleştirilmiş ve halen birçok proje devam etmektedir. Özellikle, ulaştırma alanında bölünmüş yollar ve yüksek hızlı tren hatları yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Ülkemiz coğrafi yapısının oldukça engebeli olması bu çalışmalar esnasında birçok karayolu ve demiryolu tünelinin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Özellikle kil zeminlerde yapılan tünellerde büyük problemler görülmektedir. Bu problemlerden dolayı yol güzergâhları değişebilmekte veya bazı tünel açma cihazları tünel içerisinde sıkışmaktadır. Projenin konusunu aşırı konsolidasyon oranı farklı kil zeminlerde tünel dizaynında görülen deformasyonlar modellenerek aşırı konsolidasyon oranının tüneldeki deformasyonları ne oranda etkileyeceği bu projenin konusunu oluşturmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Tünel, Aşırı konsolide kil, Tünellerin Deformasyonu, Sonlu elemanlar yöntemi

## **1. Ara Rapor-Sonuç Rapor Döneminde Yapılan Çalışmalar**

Ara rapor dönemine kadar proje kapsamında literatür çalışması, bilgisayar programı ve program çıktılarının alınabilmesi için A4 kağıt alımı yapılmıştır. Ara rapor ve sonuç rapor arasında ise alınan sonlu elemanlar programı PLAXIS modellemelerinin oluşturulması ve analiz sonuçları elde edilmiştir.

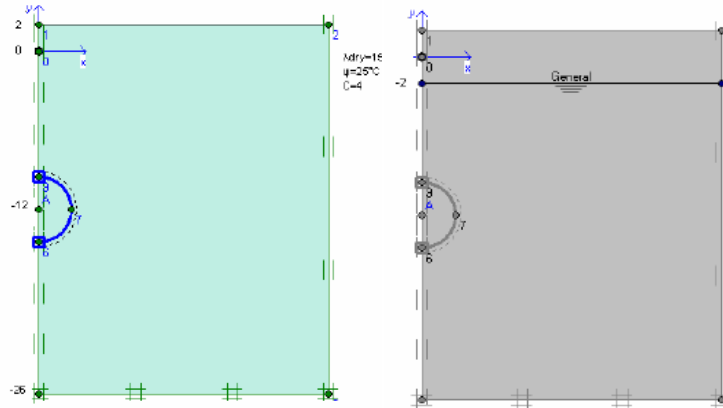
### ***1.1. Literatür Taraması***

Ülkemizde hızla gelişen demiryolu hatları farklı güzergâhlardan geçişin yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Günümüzde küreselleşen dünya ile yapılaşma için kullanım alanlarının azalmasıyla karşı karşıya kalınmıştır. Bu sebepten dolayı, ulaşım için seçilen yol veya demiryolları güzergâhlarının bir kısmı yeraltından tünellerle geçirilmektedir. Tünel kelimesi İngiltere'nin Galler bölgesinde konuşulan Gal dilinden gelmektedir. Buradaki insanlar sıvı maddelerin taşınmasında "Tonne" adı verilen ince uzun, iki ucu kapatılmış tahtadan kaplar kullanırlardı. Daha sonraları ise mahzen ve bodrum gibi yerleşim yerlerine bu ad verilmiş ve 19. Yüzyılın ikinci yarısından sonra yaygınlaşarak tünel sözcüğü bugünkü anlamıyla kullanılmaya başlanmıştır. Tünel, ekseninin eğim açısı  $30^0$  den küçük olan, iki ucu açık ve boyuna göre çapı çok küçük olan yapılardır. Tünel, kazılabilen ve tahkim edilebilen yer altı geçiştir (Köse vd. 2007). Başka bir deyişle ise tünel; demiryolu, karayolu, yaya yolu, kanal vb. taşıma yollarının bir kısmının, yeryüzünden geçirilmesinin teknik bakımdan olanaksız olduğu ya da ekonomik bakımdan uygun bulunmadığı yerlerde, yeraltından geçirilmesi için başvuru mühendislik yapılarıdır. Tüneller açılma ve kullanılma amaçlarına göre yol tünelleri ve akışkan nakil tünelleri olarak 2 gruba ayrılmaktadır. Yol Tünelleri, demiryolu tünelleri, karayolu tünelleri, su taşıtları tünelleri, yaya tünelleri ve metrolar olarak sıralanırken; Akışkan Nakil Tünelleri ise hidroelektrik santral tünelleri, su temini amaçlı tüneller, alt yapı tünelleri ve maden nakliye tünelleri olarak sıralanmaktadır (Köse vd., 2007). Tünelcilik tünelin içinde açıldığı malzemeye bağlı olarak kayada tünelcilik ve zeminde tünelcilik

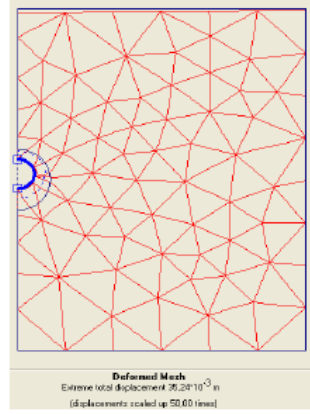
olarak 2 gruba ayrılır. Bu iki malzemede yapılan tünelleme çalışmaları birbirinden çok farklıdır. Bu farklılık kaya ve zeminin mekanik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu yüzden bu iki malzemede tünelleme işlemi de farklılıklar göstermektedir (Köse vd. 2007).

Geoteknik mühendisliğinde sonlu elemanlar yöntemi son yıllarda yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Temel dizaynı, zemin iyileştirme dizaynı, tünelleme dizaynı, baraj dizaynı gibi birçok önemli proje çalışmalarında özellikle sonlu eleman yöntemlerinden birisi olan plaxis programı kullanılmaktadır (Osmanoğlu, 2007; Demir, 2007; Erdil, 2008; Cortlever ve Gutter , 2010; Lahuta ve Cihlarova, 2012; Dikmen, 2013; Türkoğlu, 2013; Selman, 2014; Nomaler, 2018)

Osmanoğlu 2007 çalışmasında tünelleri sayısal analiz yöntemlerinden biri olan sonlu elemanlar programı Plaxis kullanarak incelenmiştir. Şekil 1.'de problem geometrisi ve yeraltı suyu durumu verilen tünelleme geometrisi incelenmiştir. Araştırmacı bu çalışma ile tünelleme mevcut olduğu zeminlerde bir binanın yapılıp yapılamayacağını ve tünelleme kaplamasında meydana gelen deformasyonları incelemiştir. Elde edilen sonuçlar ile meydana gelen deformasyonları (Şekil 2.) kabul edilebilir sınırlar içinde tutmak için zemin iyileştirme yöntemleri uygulayarak karşılaştırma yapmıştır.



Şekil 1: Problem Geometrisi ve yeraltı suyu durumu



Şekil 2. Hesap Aşamasında Zemin Yüzeyinde Meydana Gelen Deformasyon

Cortlever ve Gutter (2010), yaptıkları çalışmada önerilen çift demiryolu hattının kesitleri için AuGeo metoduna göre inşa edilmiş bir setin tasarımını modellemişlerdir. Demiryolunun iki piste uzatılması gerektiğini belirterek ikinci parçanın bazı bölümlerinin var olan parçanın yanında bulunacağını belirtmişlerdir. Diğer bölümlerde, demiryolunun her iki pistinin daha uygun bir bölgeye taşınacağını ifade etmişlerdir. Bölgede uzun dönemdeki ikincil konsolidasyon oturmasını önlemek için zemin iyileştirme çalışmalarını gerektiğini belirterek güzergâhı modellemişlerdir. Çalışmalarında temel tasarımını İngiliz Standart BS8006'ya göre yapmışlardır. Bu standart, hesaplamalara dahil edilmesi gereken yük sistemlerini tanımlamaktadır. Tasarımı, PLAXIS 2D sayısal analiz programı kullanılarak doğrulamışlardır. Hesaplamalarda bazı çarpıcı farklılıklar tespit etmişlerdir. Lahuta ve Cihlarova 2012 yaptıkları çalışmada Ostrava'daki mevcut yol ağına bağlantı yolu sağlamak için D47 otoyolunun inşasına ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir. Klasik zemin setinin uygulanmasının mümkün olmadığı durumlarda, zemine takviye amacıyla istinat duvarlarının inşa edildiğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında, bu yapıların geoteknik ve jeodezik izlenmesi konusunda araştırma yapmışlardır. Yapıdaki tesviye noktalarını, dolgu alt katmanındaki gözenek basınçlarını (piyezometrik ölçümler), yerleşim hidrostatik tesviyesi ile gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar istinat duvarının son 20 yıldan beri takip edildiğini belirtmişlerdir. Aynı zamanda çalışmalarında yapının davranış analizlerini, Plaxis 2D ile matematiksel modelleme yaparak incelemişlerdir. Bunun aynı zamanda seçilen ölçüm yönteminin uygunluğunu ve gözlemlenen noktaların yapı üzerindeki etkin dağılımı hakkında da geri bildirim almalarına yardımcı olduğunu belirtmişlerdir. Türkoğlu 2013 çalışmasında olumsuz zemin koşullarında açılmış tünel

göçüğünü iki boyutlu sayısal analiz ile incelemiştir. Tünel göçme mekanizmasını sonlu eleman yöntemi kullanarak modellemiştir. Tünel çeperindeki deformasyonlar, birincil kaplamadaki kuvvet ve momentler, ayrıca çevreleyen zemindeki plastik deformasyon bölgeleri herbir vaka için belirlenerek karşılaştırma yapılmıştır. Sonuçta, öngörülme-yen zemin koşullarının deformasyonları büyük oranda arttıracacağı ve invertteki birincil kaplamada halka kapanması uygulanmamış olmasının çökmede anahtar rol oynadığı sonucuna varıldığını belirtmiştir. Selman 2014 çalışmasında geniş hacimli tek bir makas tünelin kazısının etkilerini ve zemin davranışını sonlu elemanlar yöntemini kullanan Plaxis programıyla zemin ile tünel kazı aşamalarını modellemiştir. Elde edilen deformasyonlar ve zemin hareketleri sonrasında Burland yöntemiyle bina hasarlarını tahmin etmeye çalışmıştır. Bu proje kapsamında, aşırı konsolidasyon oranı farklı kil zeminlerde tünel dizaynında görülen deformasyonlar modellenmiştir. Modellemeler yapıldıktan sonra aşırı konsolidasyon oranının tüneldeki deformasyonları ne oranda etkilediği karşılaştırılmıştır.

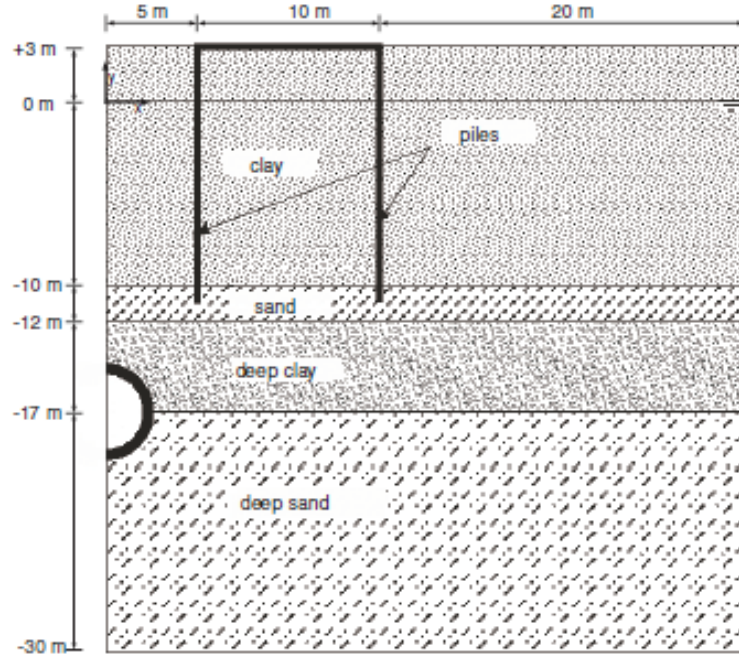
## ***1.2. Kullanılan Yöntem***

Bu projede, karayolu ve demiryolunda inşa edilen tünellerin, farklı zemin durumlarında deformasyon davranışını sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenmesi amaçlanmıştır. Proje kapsamında, dünya ve Türkiye’deki tünellerin incelenmesi, konsolidasyon oranı farklı kil zemin profillerinin belirlenerek zemin parametrelerinin seçilmesi, seçilen zemin parametrelerinin programa girilerek tünellerin modellenmelerinin yapılması ve sonrasında karşılaştırılması yapılacaktır. Bu projede, proje kapsamında alınması düşünülen sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapan 2 boyutlu Plaxis 2D programı kullanılmıştır. Geoteknik mühendisliğinde Plaxis 2D programı özellikle deformasyon ve stabilite problemlerinin analizi için geliştirilmiştir (Brinkgreve 2002). Plaxis 2D, stabilite problemleri ve gerilme şekil değiştirme problemleri ile zemin içindeki su hareketini inceleyen iki boyutlu sonlu elemanlar metodu ile çalışan bir geoteknik mühendisliği programıdır. Geoteknik mühendisliğinin çalışma alanları genel olarak temeller, kazı ve şevler, dolgular, istinat yapıları ve yeraltı yapılarıdır. Plaxis geoteknik mühendisliği

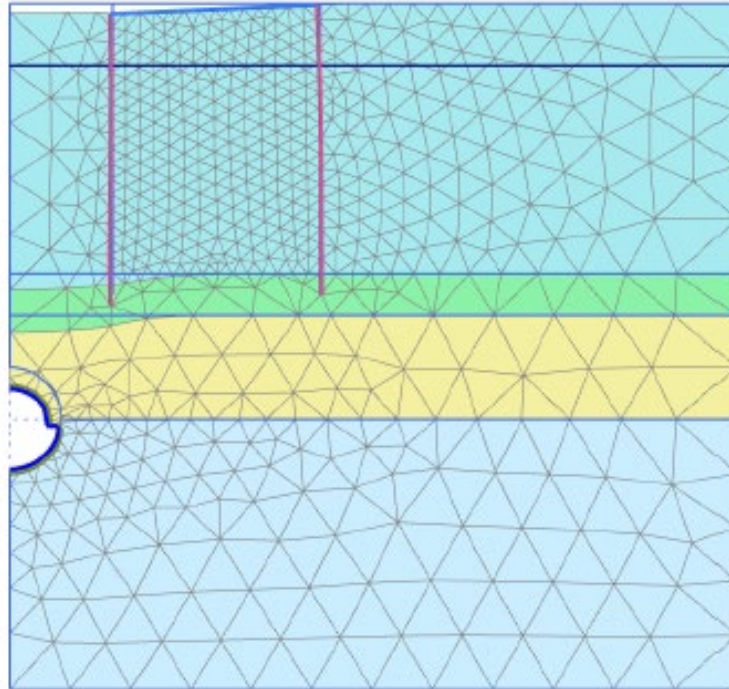
projelerinde kompleks problemleri sonlu elemanlar yöntemi yardımı ile çözebilmeye yarayan, deformasyon analizleri, stabilite analizleri, dinamik analizler, zamana bağlı davranış analizleri yapan ve yapı ile zemin arasındaki ilişkiyi modelleyen bir programdır. Plaxis 2D programı, özellikle tünel gibi yapıların karmaşık zemin durumlarında geoteknik uygulamalarının analizi için önemli özelliklere sahip bir programdır. Plaxis geoteknik mühendisliğinde dünya çapında kullanılan bir analiz ve dizayn programıdır (Galavi, 2010). 1987 yılında Delft Teknoloji Üniversitesi'nde Hollanda Kamu İşleri ve Su Yönetimi bakanının daveti üzerine yapılan programın başlangıç amacı Hollanda'daki yumuşak zemin üzerine inşa edilen ovalardaki nehir dolgularının analizinin yapılmasıydı. 1988 yılında Windows işletim sisteminde kullanılabilir ilk Plaxis 2D yayınlanmıştır (Brinkgreve vd., 2012). Plaxis, sayısal uzman olmayan ve işin uygulama kısmında çalışan geoteknik mühendisleri tarafından pratik analize yönelik bir araç sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Şantiyede işin uygulanması oldukça uzun süreler gerektirmektedir. Plaxis programı şantiyede çalışan geoteknik mühendislerinin problemin analizini ve dizaynını yapmasına yardımcı olmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, sürekli bir ortamın sonlu elemanlara bölünerek denklemlerin her bir eleman için yazılıp, integre edilerek sistem denklemlerinin elde edilmesidir. Böylelikle bilgisayarla çözülebilir olması, geliştirilen formülasyonun birçok probleme uygulanabilmesi, karmaşık geometri, yükleme, sınır koşulları ve malzeme durumunu dahil etmesi mühendislik problemlerinde özellikle geoteknik konularında analiz için kolaylık sağlayan bir yöntemdir (Örnek vd 2007). Geoteknik konularının birçok problemde temel hesabı (Mısır vd 2008, Laman ve Yıldız 2003), ankraj sistemlerinde (Örnek vd 2007) ve tabakalı zeminlerin davranışı (Yıldız vd 2009) gibi konularda birçok problemin çözümünde sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm yapan 2D Plaxis ile çalışmalar yapılmıştır. Bu proje ile karayolu ve demiryolunda inşa edilen tünellerin olası zemin sorunları özetlenerek özellikle Türkiye gibi ekonomisi büyüyen ülkelerde hızlı demiryollarının ülke çapında yapılmasıyla önemi daha da artan tünellerin konsolidasyon oranı farklı kil zemin durumlarında modellenerek deformasyon davranışları sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir.

Ara rapora kadar proje kapsamında satın alma işlemi tamamlanan programın örnek çözümleri yapılmıştır. Şekil 3.'de örnek bir tünel geometrisi ve zemin tabakası verilmiştir. Programda öncelikle elimizdeki veriler programa işlenmektedir. Program çalıştırıldıktan

sonra, sonuçta bu tünel sonrası gözlenmesi beklenen deformasyon grafiği elde edilmektedir (Şekil 4).

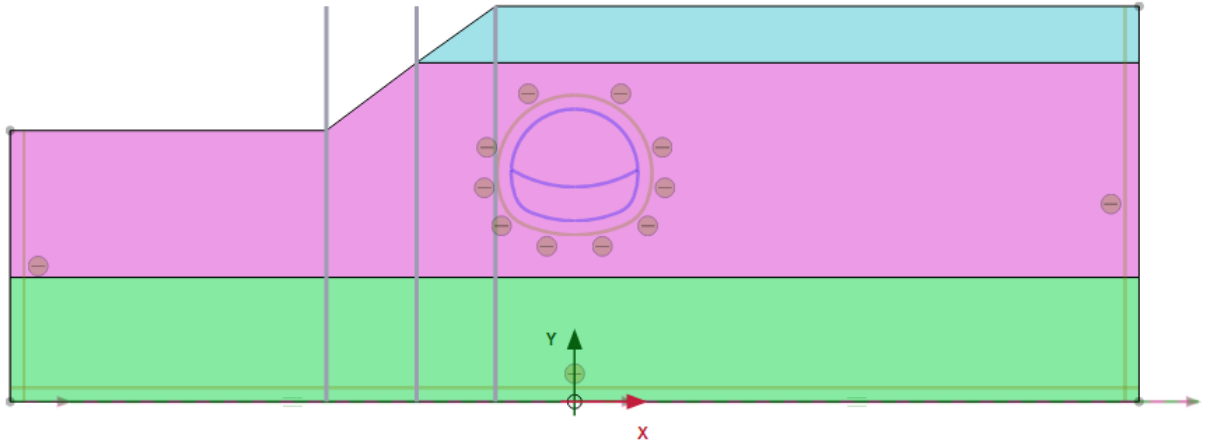


Şekil 3. Zemin tabakaları ve tünel geometrisi



Şekil 4. Tünel yapımı sonrası deformasyon ağı

Ara rapor sonrasında farklı aşırı konsolide oranlarında tünelleri hazırlanarak deformasyonlar elde edilmiştir. Bu proje kapsamında Avusturya Yeni Tünel Açma Yöntemi (NATM) ile yapılan tünellerde statik ve dinamik koşullarda farklı kil zeminlerde deformasyonlar belirlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapan Plaxis 2D programı kullanarak tüneller modellenmiştir. Öncelikle 3 farklı sondaj kuyusu açılarak 3 farklı zemin profili oluşturulmuştur (Şekil 5). Tünel yapımında Hoek-Brown yöntemi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizi yapılan kil zeminlerin özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.



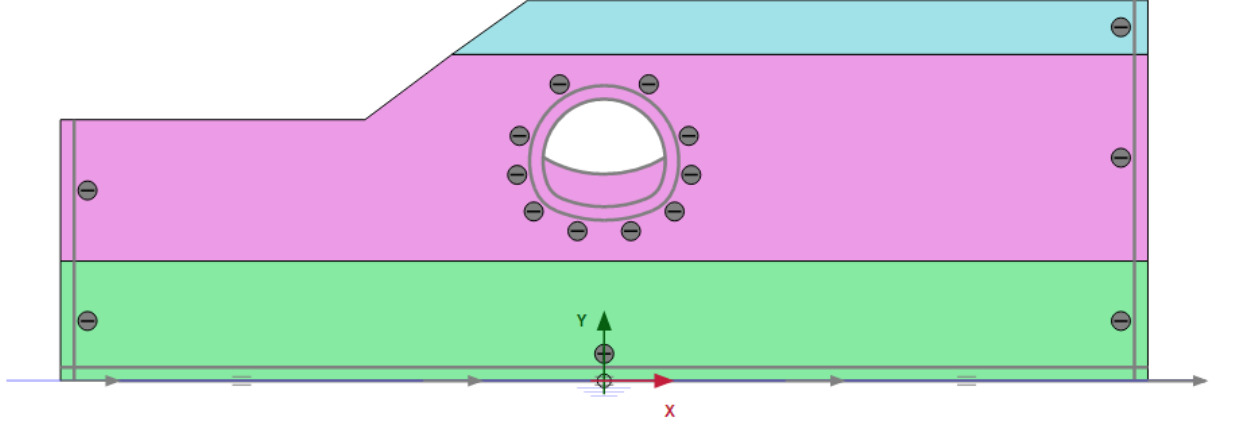
Şekil 5. Sondaj yapımı

Tablo 1. Kil zemin özellikleri

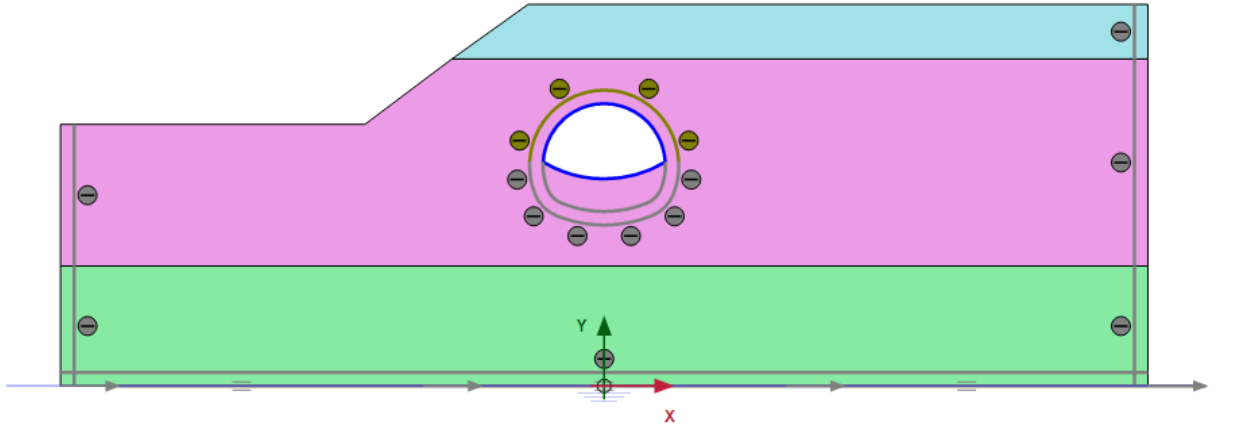
Zemin Katmanı	Zemin Türü	Young Modülü	Poisson Oranı	Jeolojik Kuvvet İndeksi (GSI)	Serbest Basınç Dayanımı ( $\sigma_{ci}$ )
1. Katman	Kil	0.200E6	0.2500	10	5.00E3
2. Katman	Kil taşı	1.000E6	0.2500	40	25.00E3
3. Katman	Kil taşı-Kireç taşı	2.500E6	0.500	55	50.00E3

Oluşturulan zemin katmanlarından sonra zeminin içerisinde kazı işlemi yapılarak tünel oluşturulmuş ve bu tünellerin ara yüzleri belirlenmiştir. Tünel kazısı esnasında çökme oluşmaması için iki farklı kazı işlemi yapılmıştır. 1. aşamada tünellerin üst kısmı kazılarak (Şekil 6) 2. aşamada bu kısım betonlanmıştır (Şekil 7). 3. aşamada tünellerin alt kısmı kazılarak (Şekil 8) 4. aşamada bu kısım betonlanmıştır (Şekil 9). Arazi sonlu elemanlar

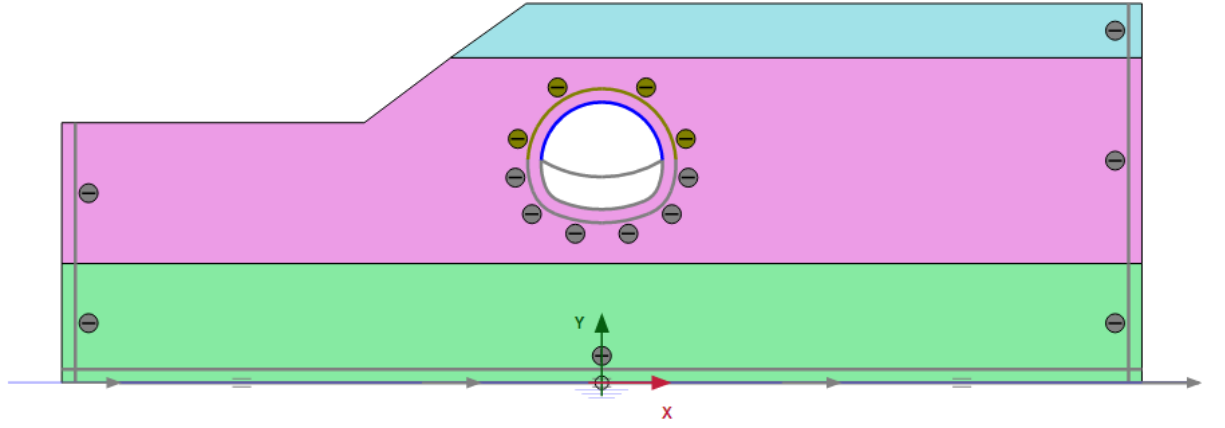
yönteminde kullanılmak üzere ağırlara bölündükten sonra her bir aşamada oluşan deformasyonlar belirlenmiştir (Tablo 2) (Şekil 10).



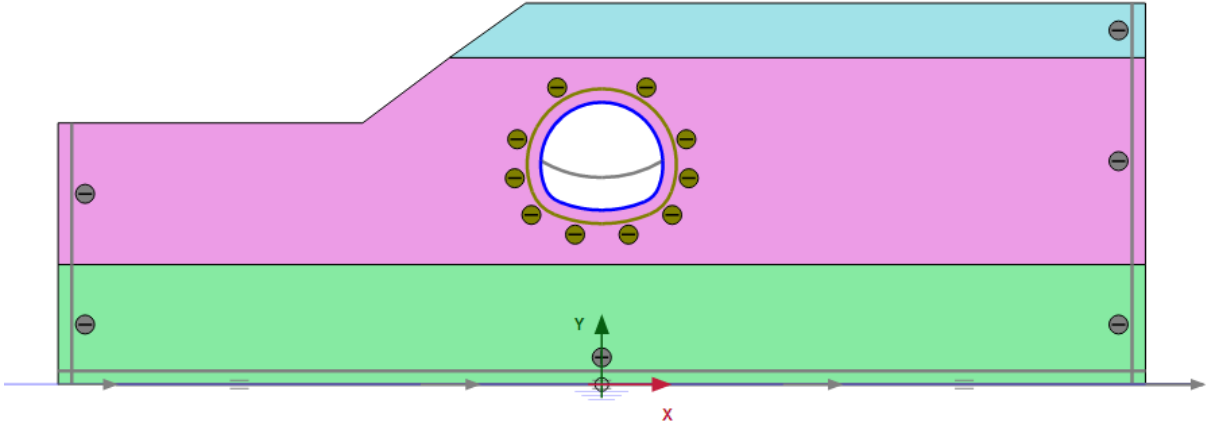
Şekil 6. Tünel üst kazısı



Şekil 7. Tünel üstü betonlanması



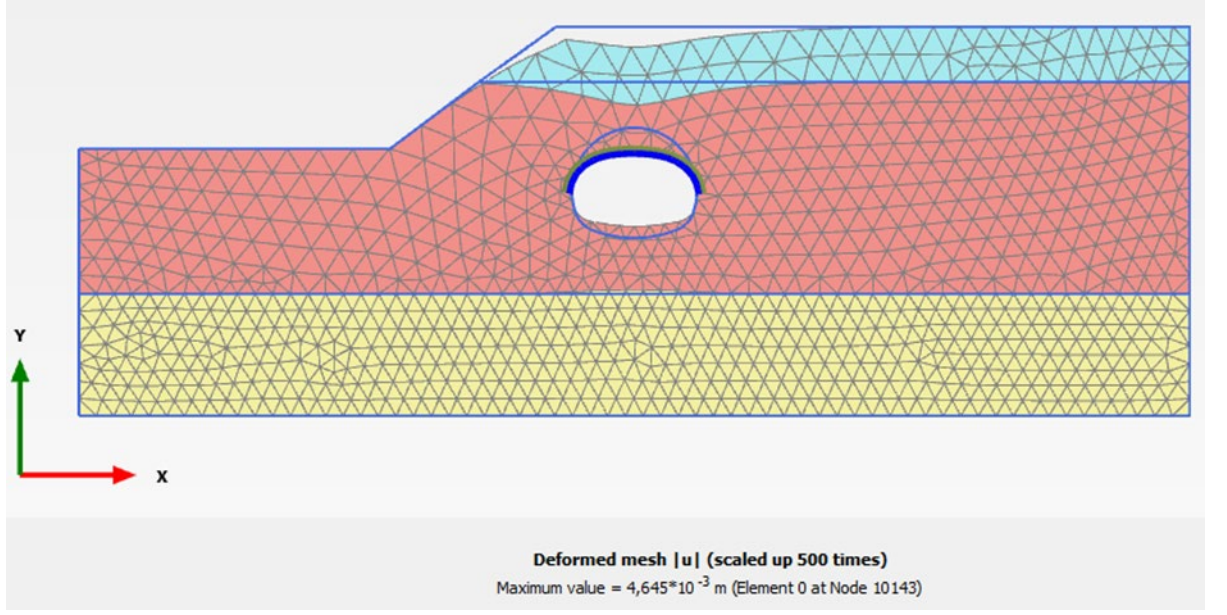
Şekil 8. Tünel alt kazısı



Şekil 9. Tünel altı betonlanması

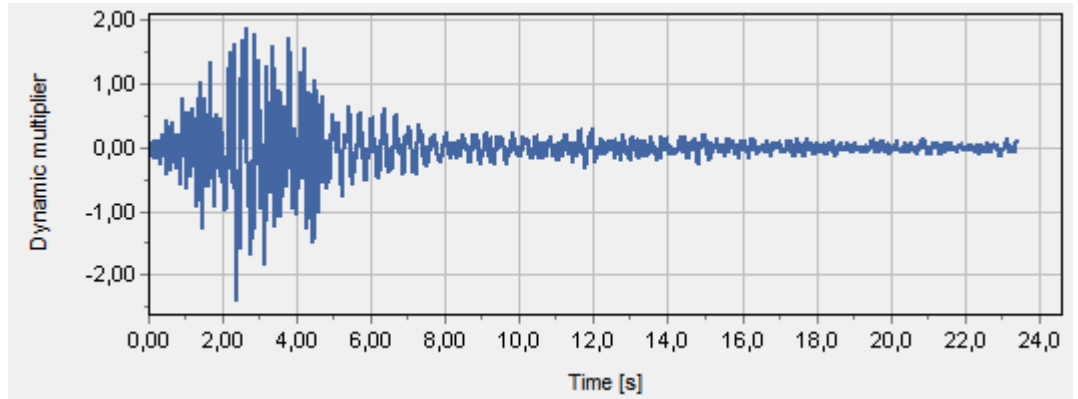
Tablo 2. Tünel yapımı sırasında oluşan deformasyonlar

Aşamalar	Deformasyon (mm)
1. Aşama (Tünel üst kazısı)	2.818
2. Aşama (Tünel betonlanması)	4.070
3. Aşama (Tünel alt kazısı)	4.644
4. Aşama (Tünel alt betonlanması)	4.592

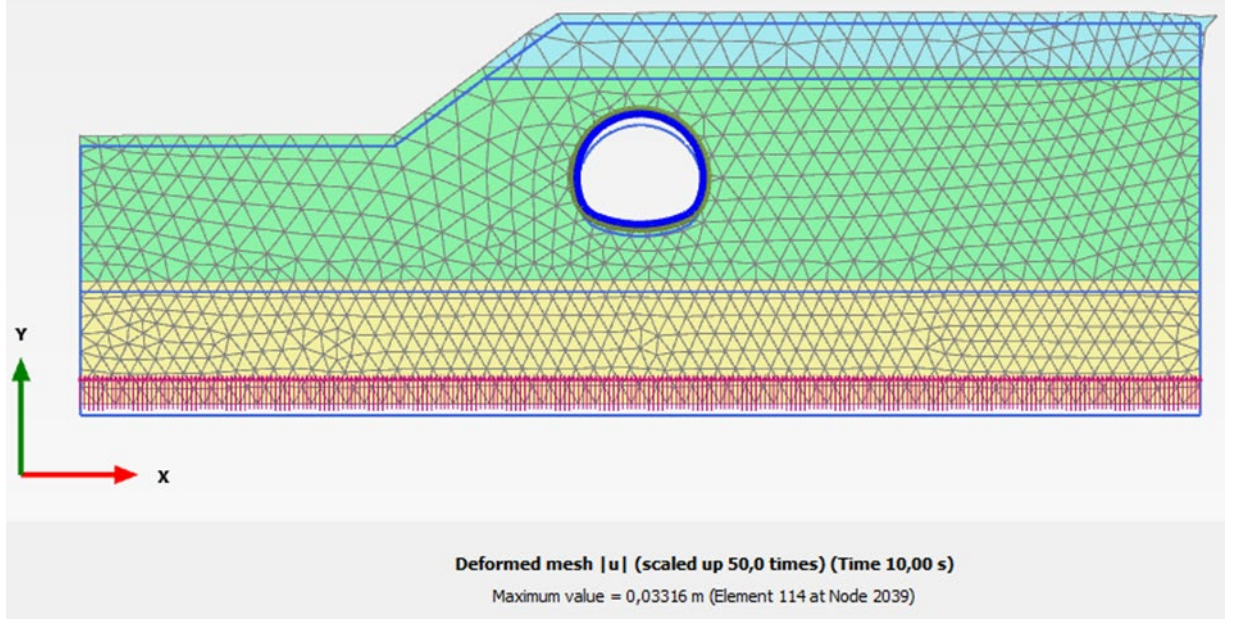


Şekil 10. Tünel yapımı deformasyonu

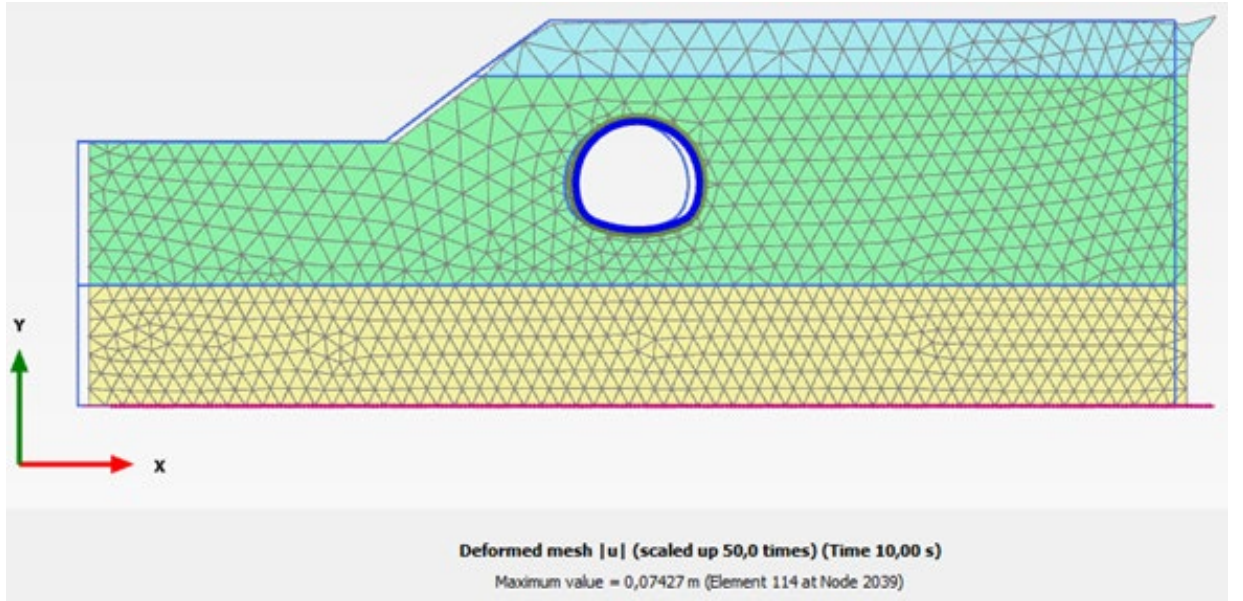
Statik koşullarda deformasyonları belirlenen tünel inşaatının tamamlanmasından sonra Yerel (Lokal) Büyüklüğü (Ml) 5.4 olan depremin ivmesi (Şekil 11) zaman tanım alanında hesap yöntemi ile tünele x ve y eksenlerinde (yatay ve dikey) etki ettirilerek dinamik koşullar altında tünelin deformasyonları bulunmuştur (Şekil 12-13). Bulunan deformasyonlar x ve y eksenleri için Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 11. Zaman-tanım ivme grafiği



Şekil 12. Dinamik etkiler altında düşey yönde oluşan deformasyonlar

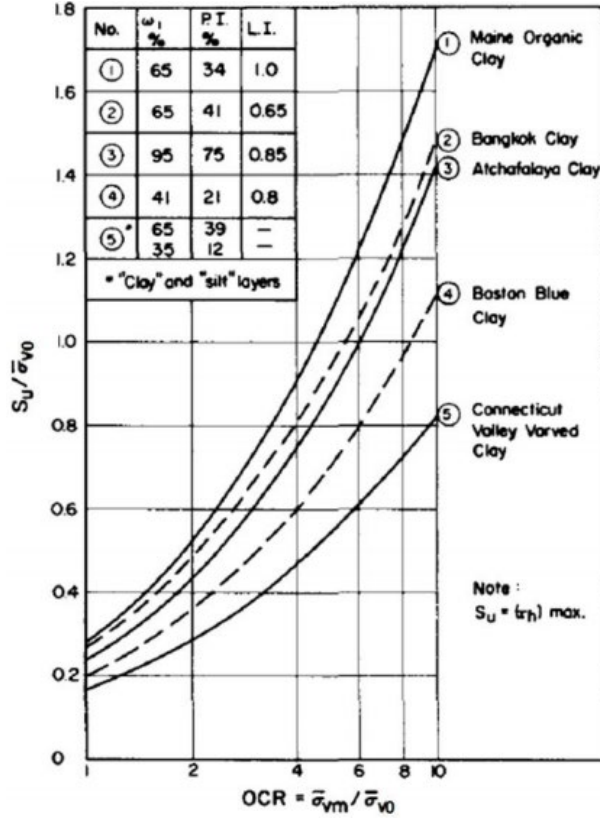


Şekil 13. Dinamik etkiler altında yatay yönde oluşan deformasyonlar

Tablo 3. Dinamik etkilerden dolayı oluşan deformasyonlar

Etki Yönü	Deformasyon (mm)
X yönü	74.27
Y yönü	33.16

Proje kapsamında kil zeminlerde oluşturulan tünellere aşırı konsolidasyonun etkisi araştırılmıştır. Ladd ve Foott (1974) 5 farklı kil zemin kullanarak yaptıkları çalışmada normalize drenajsız kayma mukavemetinin aşırı konsolidasyon oranı ile değişimini incelemişlerdir. Aşırı konsolidasyon oranının artmasıyla drenajsız kayma mukavemetinin de arttığını gözlemlemişlerdir (Şekil 14) Killerde drenajlı kayma direnci ( $c_u = q_u / 2$ ) olarak belirlenmektedir.



Şekil 14. Ladd ve Foott (1974) AKO ile drenajsız kayma mukavemeti ilişkisi

Bu projede farklı aşırı konsolidasyon oranına sahip zeminlerin modellenmesi amacıyla farklı serbest basınç dayanımına sahip kil zeminlerde tünel inşaatı yapılarak dinamik etkiler karşılaştırılmıştır. Tünelin yapıldığı kil zeminin özellikleri değiştirilirken 1. ve 3. katmandaki zeminlerin özellikleri aynen kullanılmıştır. Bu sayede aşırı konsolidasyon oranına bağlı olarak değişen serbest basınç dayanımı ile tünel inşaatında kil zeminin davranışı incelenmiştir. Yapılan analizlerde sadece serbest basınç dayanımı değiştirilmiş diğer özellikler aynen kullanılmıştır. Kullanılan zeminlerin özellikleri Tablo 4'te verilmiştir. Yapılan analizler sonucunda tünel yapımı esnasında oluşan deformasyonlar Tablo 5'te verilmiştir.

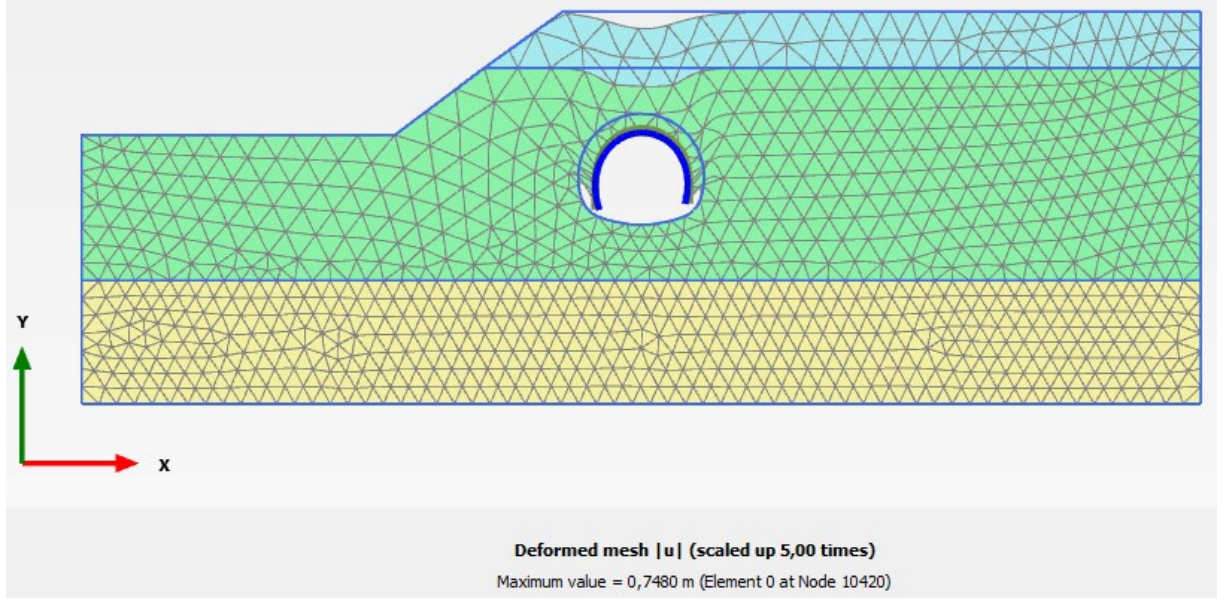
Tablo 4. Analizlerde tünelin yapıldığı zeminlerin özellikleri

Analiz	Young Modülü	Poisson Oranı	Jeolojik Kuvvet İndeksi (GSI)	Serbest Basınç Dayanımı ( $\sigma_{ci}$ )
1. Analiz	1.000E6	0.2500	40	25.00E3
2. Analiz	1.000E6	0.2500	40	5.00E3
3. Analiz	1.000E6	0.2500	40	50.00E3

Tablo 5. Tünel yapımı sırasında oluşan deformasyonlar

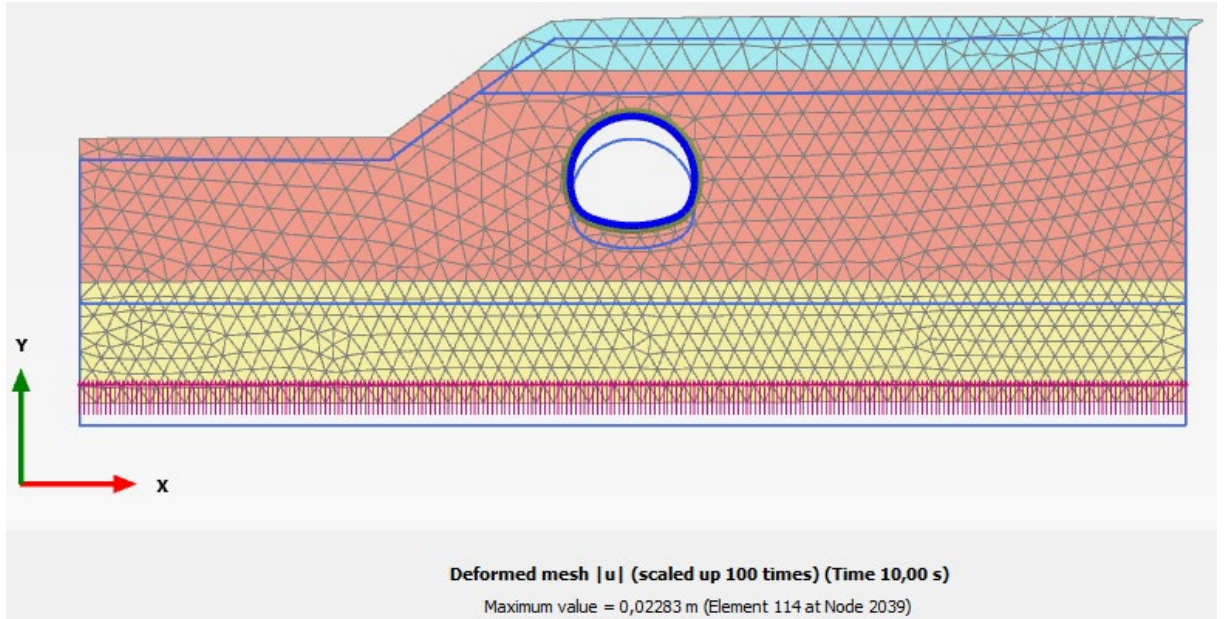
Analiz	1. Analiz	2. Analiz	3. Analiz
Aşamalar	Deformasyon (mm)		
1. Aşama (Tünel üst kazısı)	2.818	4.530	2.610
2. Aşama (Tünel betonlanması)	4.070	6.427	4.018
3. Aşama (Tünel alt kazısı)	4.645	748.000	4.127
4. Aşama (Tünel alt betonlanması)	4.592	-	4.250

1. ve 3. analizlerde kullanılan zeminlerde yapılan analizler incelendiğinde, aşırı konsolidasyon oranına bağlı olarak serbest basınç dayanımının artmasıyla tünel inşaatı sırasında deformasyonların azaldığı görülmüştür. 2. analizde kullanılan kil zeminde ise düşük aşırı konsolidasyon oranından dolayı tünel inşaatı sırasında 3. aşama olan tünel alt kazısında yüksek miktarda deformasyonlar ortaya çıkmış ve bu da zeminin göçmesine sebep olmuştur (Şekil 15).



Şekil 15. 2. Tünel alt kazısı esnasında zeminin göçmesi

1. ve 3. analizlerde yapılan dinamik yükleme koşullarında ortaya çıkan deformasyonlar Tablo 6'da verilmiştir. Buna göre, aşırı konsolidasyon oranının artmasıyla dinamik yükleme durumunda fazla fark olmamasına rağmen deformasyonların azaldığı gözlenmiştir (Şekil 16). Yapılan dinamik analizler sonucunda tünellerde yatay yöndeki deformasyonların düşey yöndekilere kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 16. AKO'su yüksek kil zeminde düşey yönde ortaya çıkan deformasyonlar

Tablo 6. 1. ve 3. analizde dinamik etkiler altında ortaya çıkan deformasyonlar

Analiz	1. Analiz	3. Analiz
Etki Yönü	Deformasyon (mm)	Deformasyon (mm)
X yönü	74.27	61.12
Y yönü	33.16	22.83

## 2. Mali Etkinlikler

Çalışmada kullanılan sayısal analiz yöntemlerinden biri olan sonlu elemanlar programı Plaxis 2D programı, proje bütçesi ile satın alınmıştır ve tüm bütçe harcanmıştır (Şekil 17). Ara rapor dönemine kadar program örnekleri çözülerek programın etkin bir şekilde çalıştırılması sağlanmıştır.



Şekil 17. Plaxis 2D programının ve kullanım bilgilerini içeren bellek

Ara rapor sonrası ise Avusturya Yeni Tünel Açma Yöntemi (NATM) ile yapılan tünelde statik ve dinamik koşullarda farklı aşırı konsolidasyon oranlarında kil zeminde deformasyonlar belirlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapan Plaxis 2D programı kullanarak tünel modellenmiştir

## 2. Sonuçlar

Proje ara rapor dönemine kadar, proje çalışma planına uygun olarak literatür araştırması yapılmış, proje bütçesi kapsamında program ve A4 kağıt alımı yapılmıştır. Öncelikli olarak program örnekleri çözülerek programın etkin bir Şekilde alıştırılması sağlanmıştır.

Ara rapor sonrası, Avusturya Yeni Tünel Açma Yöntemi (NATM) ile yapılan tünelde statik ve dinamik koşullarda farklı aşır konsolidasyon oranlarında kil zeminde tünel modellemeleri yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapan Plaxis 2D programı kullanarak tünel modellerinde deformasyonlar belirlenerek, farklı aşır konsolidasyon oranlarının tünel deformasyonlarına etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, farklı aşır konsolidasyon oranına sahip zeminlerin modellenmesi amacıyla farklı serbest basınç dayanımına sahip kil zeminlerde tünel inşaatı yapılarak dinamik etkiler karşılaştırılmıştır. Tünelin yapıldığı kil zeminin özellikleri değiştirilirken 1. ve 3. katmandaki zeminlerin özellikleri aynen kullanılmıştır. Bu sayede aşır konsolidasyon oranına bağlı olarak değişen serbest basınç dayanımı ile tünel inşaatında kil zeminin davranışı incelenmiştir. Yapılan analizlerde sadece serbest basınç dayanımı değiştirilmiş diğer özellikler aynen kullanılmıştır. Aşır konsolidasyon oranına bağlı olarak serbest basınç dayanımının artmasıyla tünel inşaatı sırasında deformasyonların azaldığı görülmüştür. Düşük aşır konsolidasyon oranında ise tünel inşaatı sırasında 3. aşama olan tünel alt kazısında yüksek miktarda deformasyonlar ortaya çıkmış ve bu da zeminin göçmesine sebep olmuştur. Dinamik yükleme koşulları incelendiğinde ise aşır konsolidasyon oranının artmasıyla dinamik yükleme durumunda fazla fark olmadığı, fakat deformasyonların azaldığı gözlenmiştir. Yapılan dinamik analizler sonucunda tünelde yatay yöndeki deformasyonların düşey yndekilere kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür.

#### 4. Kaynaklar

Brinkgreve, R. B.BJ. 2002. "Plaxis Finite Element Code for Soil and Rock Analysis, 2D Version 8.6", Balkema, Rotterdam.

Brinkgreve, R. B. J., Engin, E., Swolfs, W. M., Waterman, D., Chesaru, A., Bonnier, P. G., ve Galavi, V. 2012. "Plaxis 3D 2012", Plaxis bv.

Cortlever, N. G. ve Gutter, H. H. 2002. "Design of double track railway Bidor-Rawang on AuGeo Piling System according to BS8006 and PLAXIS numerical analysis", In Proc. of the 4th Int. Conf. on Ground Improvement Techniques, pp. 26-28.

Demir, H. 2007. "Taş Kolon ve Geopier Uygulaması ile Zemin İyileşimesi", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Programı.

Dikmen, M. 2013. "Kil Zemine Oturan Temellerin tturma ve Taşıma Gücü Davranışına Geotekstil Takviyesinin Etkisinin Deneysel ve Plaxis 3D Programıyla İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Programı.

Erdil, B. 2008. "Jetgrout Kolonu Tasarım Taşıma Gücü Hesabı", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Galavi, V. 2010. "Groundwater flow, fully coupled flow deformation and undrained analyses in PLAXIS 2D and 3D", Technical report, Plaxis BV 2010, p. 290.

Köse, H., Gürgen, S., Onaran, T. Yenice, H., Aksoy C. O. 2007. "Tünel ve Kuyu Açma", D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Yayınları, ISBN: 975-441-234-0, İzmir.

Ladd and Foott 1974, New design procedure for stability of soft clays. Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 100GT7, July, 763-786.

Lahuta, H. ve Cihlarova, D. 2012. "Experience with mathematical modeling in program plaxis: design and assessment of retaining walls", 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2012, 2 (12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM2012), 87-94.

Laman, M. ve Yıldız, A. 2003. "Model Studies of Ring Foundations on Geogrid-Reinforced Sand", Geosynthetics International, Vol 10(5), 142-152.

Mısıır, G., Demir, A., Örnek, M., Yıldız, A., Laman, M. 2008. "Yumuşak Kil Zeminler Üzerine Oturan Dairesel Temellerin Analizi", Zemin Mekaniği ve Temele Mühendisliği, 12. Kongresi, 16-17 Ekim 2008, Selçuk Üniversitesi.

Osmanoğlu, D. 2007. "Tünellerde Zemin İyileştirmesi ve Stabilitenin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Plaxis Programında Analiz Edilmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Örnek, M., Laman, M., Yıldız, A., Demir A., Tekinsoy, M. A. 2007. "Ankrajlı İksa Sistemlerinin Sayısal Analizi", 2. Geoteknik Sempozyumu, 22-23 Kasım 2007.

Plaxis 2D Tutorial Manual 2018

Selman, H.G. 2014. "Tünel Kazısı Sebebiyle Meydana Gelen Zemin Oturmaları ve Mevcut Yapılara olan Etkilerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Türkoğlu, M. 2013. "Olumsuz Zemin Koşullarında açılmış Tünel Göçüğünün İki Boyutlu Sayısal Analizi", Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Yıldız, A., Laman, M., Örnek, M., Demir, A. 2009. “Tabakalı Zeminlerin Rijitliklerinin Zemin Davranışına Etkisi”, 3. Geoteknik Sempozyumu, 3-4 Aralık 2009.

Nomaler, Ş. 2018. “1999 Kocaeli Depreminde Adapazarı’nda Yapı Yüğü Altında Zemin Davranışı”, Sakarya Üniversitesi, FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Programı.