

## Tünel Kazı Jet-grout Destek Sistemleri ve İnşa Aşamalarının 3B Tedrici Etkileri: İsviçre Aescher (Zürih) Tünel Örneği

Faruk ELMAS<sup>ID\*</sup>, Halil Murat ALGIN<sup>ID1</sup>, Arda Burak EKMEK<sup>ID1</sup>,

\*1 Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, ŞANLIURFA

(Alınış / Received: 30.03.2022, Kabul / Accepted: 20.04.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2022)

### Anahtar Kelimeler

Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar  
Analizi,  
Tünel Kazı Aşamaları,  
Jet-Grout,  
Tünel Destek Sistemlerinin İnşa  
Aşamaları

**Öz:** Bu çalışmada, İsviçre'nin Zürih kentinde yer alan Aescher tünel örneği temel alınarak, tünel kazı destek sistemlerindeki detay uygulamalar ve inşa aşamaları, üç boyutlu sonlu elemanlar (3B SE) analizlerine tanıtılmış olup kullanılan bu tünel tasarımı kapsamında, kazı ve inşa aşamalarının analiz sonuçları üzerindeki tedrici etkileri araştırılmıştır. Jet-grout kolonlarla yapılan tünel destek sistemleri, geliştirilen kapsamlı 3B SE simülasyonlarında gerçek boyutlarıyla kullanılmış olup jet-grout tahkimatını müteakiben yapılan kazı uygulamaları, aşamalı inşa metodolojisi temel alınarak, hassas bir biçimde modellenmiş ve analiz edilmiştir. Bu sayede, jet grout destek sistemlerinin ve kazı aşamalarının tünel inşa sürecindeki ilerleyişi ve bu aşamaların tünel destek sistemlerine olan tedrici etkileri göz önüne alınarak, uygulanan tünel kazı sisteminin güvenliği gerçekçi olarak araştırılabilmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlar, literatürde daha önce yayınlanmış olan ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak, geliştirilen modellerin ve kullanılan parametrelerin doğrulama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, gerçek ölçüm sonuçlarına oldukça yakın (gerçek ölçüm sonucuna kıyasla 1.1 mm'lik bir hata payı ile) değerlere ulaşılmıştır. Böylece, jet-grout destek sistemleri kullanılan tünellerin 3B SE analizlerinin, kazı ve inşa aşamalarının tedrici etkileri dikkate alınarak, kapsamlı bir şekilde yapılabileceği gösterilmiş olup sunulan sonuçları temel alan uygulama detayları ile ilgili öneriler tartışılmıştır.

## 3D Progressive Effects of Tunnel Excavation Jet-grout Support Systems and Construction Phases: Switzerland Aescher (Zurich) Tunnel Example

### Keywords

Three-Dimensional Finite  
Element Analysis,  
Tunnel Excavation Stages,  
Jet-Grout,  
Construction Stages of Tunnel  
Support Systems

**Abstract:** In this study, considering the Aescher tunnel example in Zurich, Switzerland, the detailed applications and construction stages in tunnel excavation support systems are introduced to three-dimensional finite element (3D FE) analyses and within the scope of this tunnel design used, the effects of the excavation and construction stages on the analysis results are investigated. In the developed comprehensive 3D FE simulations, the tunnel support systems with jet-grout columns are represented with their real dimensions, and the excavation applications following the jet-grout implementations are comprehensively modelled and analysed based on the staged construction methodology. Accordingly, considering the progression of the jet grout support systems and excavation stages in the tunnel construction process, the progressive effects of these stages on the tunnel support systems, the safety of the applied tunnel excavation system are investigated realistically. The results obtained from the analyses are compared with the in-situ measured results previously published in the literature in order to validate the developed models and the parameters considered. In this context, the obtained values very close to the actual measured site-specific data have been attained (compared to the actual measurement result a margin of error about 1.1 mm). Paper reveals that 3D FE simulations of tunnels with jet-grout support systems can comprehensively be analysed by considering the progressive effects of excavation and construction stages, accordingly

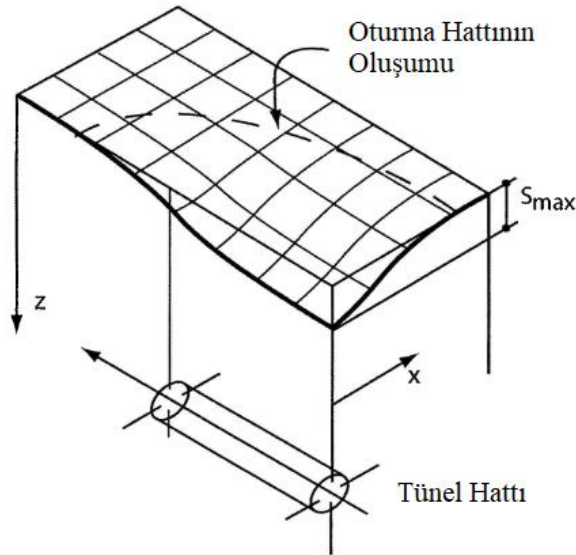
the suggestions regarding the application details based on the presented results are discussed.

\*İlgili Yazar, email: farukelmas@harran.edu.tr

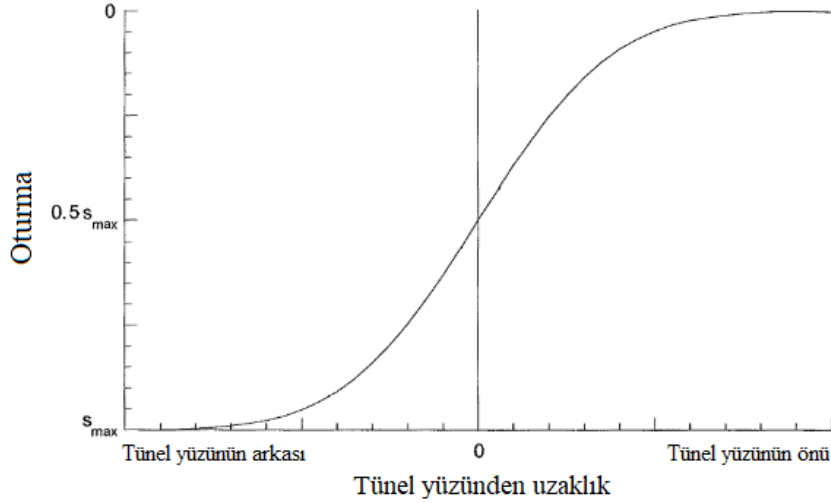
## 1. Giriş

Tüneller diğer üst yapılara kıyasla zemin ile daha fazla etkileşim halindedir. Bu nedenle tünellerin kazı aşamalarında kullanılan kazım teknikleri ve oluşacak yüzeysel oturmalar büyük önem arz etmektedir [1]. Bu durum farklı tünel kazım teknikleri ve özel tünel açma makinelerinin gelişimini sağlamıştır. Zemin iyileştirme yöntemleriyle ilerlenen yöndeki zemini güçlendirmek, tünel yüzünün zemin çivileri ile güçlendirilmesi ve tünel yüzünün üstünde koruyucu bir kalkan uygulanması gibi önlemler, zayıf zeminlerde yapılan tünel açma teknikleri kapsamında ilgi görmüş yaklaşımlardır [1].

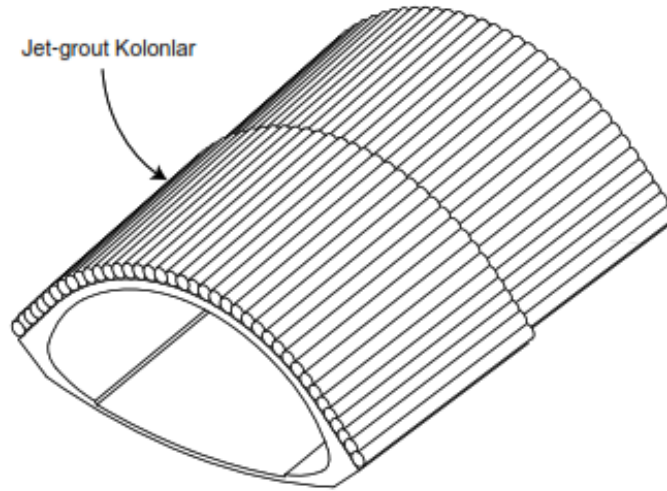
Bütün bu yaklaşımların amacı, tünel yüzünün önünde meydana gelen deformasyonları azaltarak yüzey oturmalarını sınırlamaya çalışmaktır. Ayrıca günümüzde kullanılan çoğu tünel açma tekniğinde, (örneğin, Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu - NATM), oluşan maksimum oturma miktarının yaklaşık %50'sinin tünel yüzünde geliştiği gözlemlenmiştir [2]. Bu sebeple tünel ön yüzünde yapılan güçlendirmeler ile oluşan oturma miktarının bölgesi tünelin arka yüzüne kaymaktadır. Ayrıca kalkan tünel yöntemi ile oluşan zemin basınç dengesi (EPB), nihai oturma miktarının %25-30 kadarlık bir kısmında tünel yüzü üzerinde meydana gelmektedir [2]. Sığ tünellerin merkezindeki oturmaların normal kümülatif dağılım fonksiyonu şekline sahip olduğu varsayılmaktadır [3]. Tünel kazımı esnasında zeminin Şekil 1'de görüldüğü gibi bir davranış sergilemesi beklenir [1]. Ek olarak Şekil 2'de yapılan kazı ve inşa işlemlerine bağlı oluşabilecek oturmaların değişimi gösterilmiştir [2]. Oluşacak bu deformasyonu önlemek için sıkıştırma enjeksiyonu ve geçirgenlik enjeksiyonu gibi bazı teknikler kullanılabilir. Sıkıştırma enjeksiyonu için, zemine zarar vermeden yeterli viskoziteye sahip bir harç kullanılır. Bu yolla zemine radyal gerilmeler uygulanarak zeminin ve harcın sıkışması ile bir harç kabarcığı oluşturulur [4]. Geçirgenlik enjeksiyonu için, zeminin içindeki hava boşlukları harç ile doldurularak zeminin taşıma kapasitesi artırılmaya çalışılır. Ancak geçirgenlik enjeksiyonu uygulamasının zeminin geçirgenliği ile alakalı bir problemi bulunmaktadır. Geçirgenliği az olan zeminlerde (örneğin daha ince taneli zeminler), daha düşük viskoziteli kimyasallar gerekebilmektedir. Ayrıca, zemine enjekte edilecek olan harç için zeminin anizotropisi ve homojen olmaması gibi durumlar önem kazanmaktadır [4].



Şekil 1. Tünel kazımı esnasında oluşan oturma miktarının üç boyutlu temsili gösterimi [1]



Şekil 2. Tünel yüzündeki tipik oturma değişimi [2]



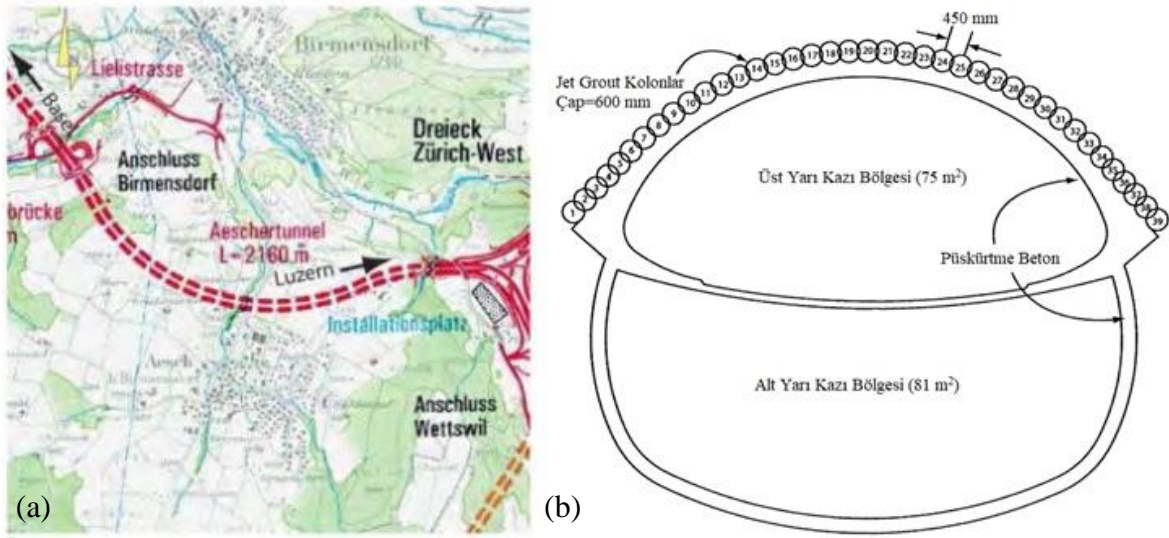
Şekil 3. Aescher Tüneli için kullanılan jet-grout kemer şemsiyesinin temsili gösterimi. [8]

Şekil 3'de gösterilen kemer formu tünel yüzündeki radyal deformasyonları azaltmada etkilidir. Radyal deformasyonların azalması, tünelin arın ekstrüzyonuna bağlı hacim kaybından oluşan yüzeysel düşey deformasyonlarda azalmaya neden olur [9]. Yüzeyde oluşan düşey deformasyonun kontrolünde, arın ekstrüzyonunun ve arın desteğinin önemi göz ardı edilmemelidir [5]. Belirtilen jet-grout uygulaması, farklı zemin şartlarında ve tünel geometrik varyasyonlarında kullanılabilmesiyle diğer yapım tekniklerine göre avantajlıdır [8].

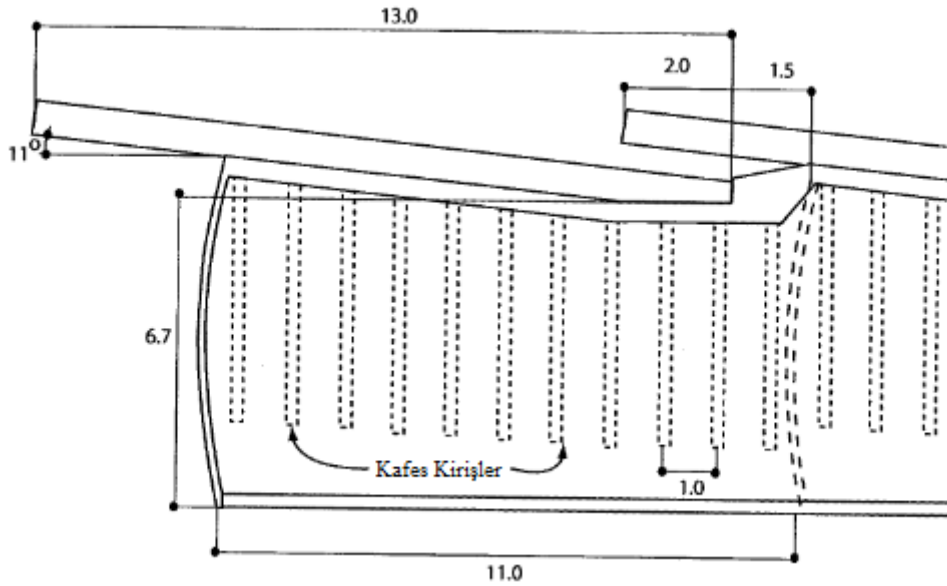
İsviçre'nin Zürih kentinde yer alan Aescher Tüneli jet-grout kemer şemsiyesi tekniği ile yapılmıştır [8]. Bu proje sırayla kumlu zemin, buzul moren ve molas ana kayasından oluşan bir zeminde birbirine yakın iki yüzeysel tünelden oluşacak şekilde tasarlanmıştır [8]. Tüneler yaklaşık olarak 2 km uzunluğunda, kesit alanı 135 m<sup>2</sup> ve her biri 0,6 metre çapında olan yataya yakın 39 adet jet-grout kolon kullanılarak tasarlanmıştır [8]. Jet-grout kolonlardan oluşan kemer formunda ise her bir kolon yatay ile 11°'lik açı yapacak şekilde zemine entegre edilmiştir [8]. Şekil 4'te inşa edilen tünellerin plan görünüşü ve Aescher tüneline kesit görünümü; Şekil 5'te ise jet-grout kolonların yerleşim tekniği gösterilmiştir. Bu proje kapsamında inşaat esnasında yüzey oturmaları düzenli olarak izlenmiştir. Oluşan bu oturmalar ile hacim kaybı %0.35 olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, diğer tünel metotlarıyla ulaşılan ölçümlerle kıyaslandığında yaklaşık olarak eşit bir hacim kaybının olduğunu göstermektedir. [1]

Bu çalışmada, İsviçre'nin Zürih kentinde bulunan yataya yakın jet-grout kolonlarının destek sistemi olarak kullanıldığı Aescher tünelinein gerçeğe yakın 3B SE modellemesi yapılmıştır. Bu kapsamda daha önce Algin ve diğ. [9] tarafından yapılan çalışma, bu yayında bir adım ileriye taşınarak kazı ve destek sisteminin inşa aşamalarının tedrici etkisi 3B SE ortamında araştırılmıştır. Tünel elemanlarının gerçeğe uygun bir biçimde modellenebilmesi amacıyla eleman (mesh) sayısı, model boyutu ve sınır şartlarının belirlenmesi gibi durumlar için yakınsama çalışması gerçekleştirilmiştir. Aescher tünelineyle ilgili

diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, 3B SE analizlerinde kazı aşamaları ve tünel destek sistemlerinin inşası dikkate alınmıştır. Destek sistemlerinin inşası ve kazı aşamaları 3B SE modeline hassas bir biçimde yansıtılarak tünel gerçek boyutlarıyla analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Coulter [1], Coulter ve Martin [8] ve Barla ve Bzowka [10] tarafından daha önce raporlanmış olan ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Kullanılan hassas modelleme tekniği sayesinde, gerçek ölçüm sonuçlarına oldukça yakın değerler elde edilmiştir.



Şekil 4. Aescher Tünelinin plan görünüşü (a) ve Aescher Tünelinin kesit görünümü (b) [8,10]



Şekil 5. Jet-grout kolon tekniği kullanılan tünelin kesit profili [1]

## 2. Materyal ve Metot

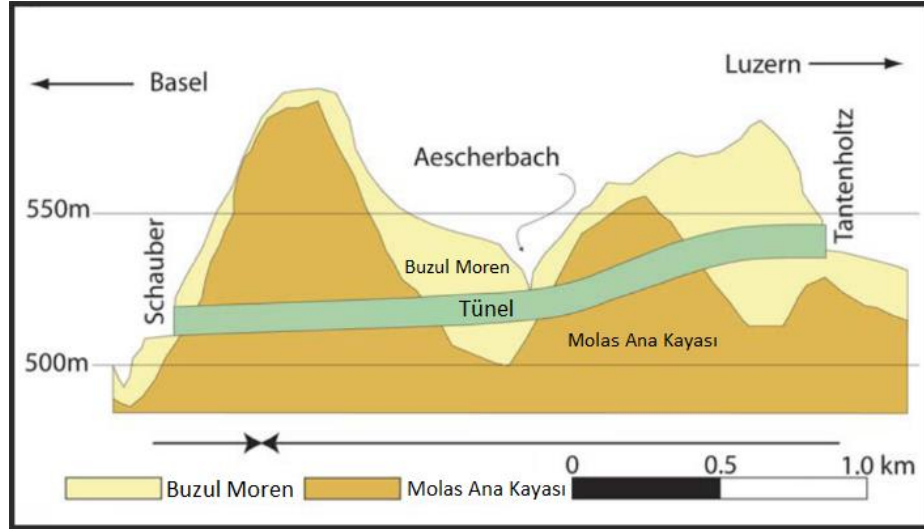
### 2.1. Aescher Tüneli

Aescher tüneli yumuşak zemine oturtulmuş iki paralel güzergahtan oluşmaktadır [8]. Şekil 4 (a)'daki planda görüldüğü üzere bu tünellerden biri Basel yönünde diğeri ise Luzern yönünde trafik akışını sağlamaktadır [8]. Basel tüneli 2055 metre ve Luzern tüneli ise 2090 metre uzunluğundadır [8]. İki tünelin merkezi arasındaki mesafe 32 metre olup tüneller zemin üst yüzeyinden 70 metre aşağıda inşa edilmiştir [8]. Tünelin inşa edildiği buzul moren tabakasında ilk aşamada bıçak kalkan destek sistemi kullanılmaya karar verilmiştir [8]. Ancak bıçak kalkan kullanımı ile zeminde 350 mm'den büyük oturmaların olacağı öngörülmüştür [3]. Bu yüzden ilgili tabakada jet-grout destek sistemi kullanılması uygun bulunmuştur [3]. Aescher tünelinin görünümü ve tünel içerisinde yapılan püskürtme beton uygulamaları ile ilgili bazı görseller Şekil 6'da verilmiştir.

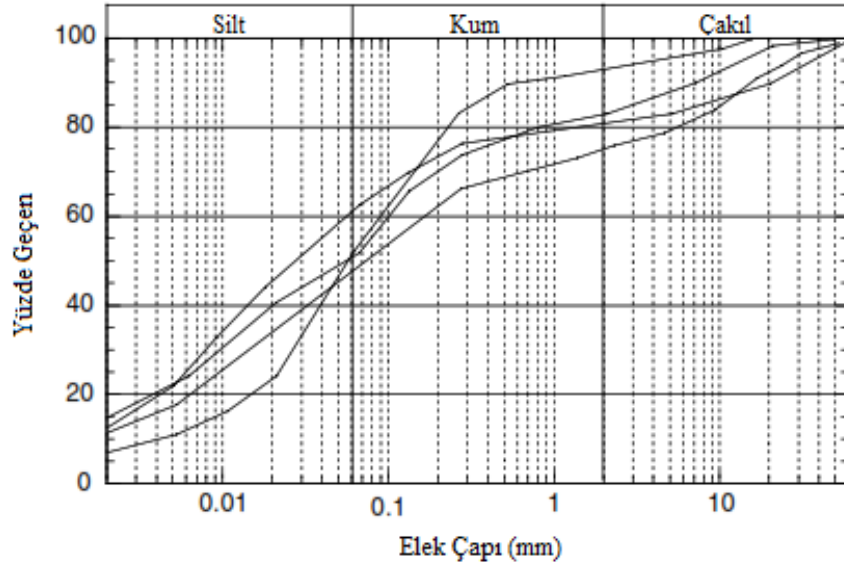


Şekil 6. Aescher tünelinin bazı görüntüleri

Şekil 7’de Aescher tünelinin zemin profili verilmiştir. Buzul moren tabakası üzerinde 0-10 m aralığında ince bir kum tabakası belirlenmiştir. Bu tabakanın yoğunluğu  $19 \text{ kN/m}^3$  ve içsel sürtünme açısı  $30^\circ$  olarak rapor edilmiştir. Buzul moren tabakasının üst yüzeyinde bazı kısımlarda yeraltı suyu ile karşılaşmıştır fakat tünel kazısı sırasında buzul morenin kuru olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca buzul morenin çakıl ve ayrışık kayalar ile birlikte killi kum ve siltten oluştuğu belirtilmiştir [8]. Aescher tüneli ile aynı bölgede yapılmış olan Eggrain tüneline de karşılaşılmış olan buzul moren zemininin granülometrisi Şekil 8’de gösterilmiştir [10]. Moren tabakasının kuru yoğunluğu  $22\text{-}23 \text{ kN/m}^3$ , elastisite modülü  $80 \text{ MPa}$ , efektif kohezyonu  $5\text{-}20 \text{ kPa}$ , efektif içsel sürtünme açısı  $32\text{-}35^\circ$  olarak raporlanmıştır [11]. Diğer tabaka olan molas kayası ise kumtaşı, silttaşı, marn ve kil marnlarından oluşmaktadır. Molas kayasının elastisite modülü  $2 \text{ GPa}$ , yoğunluğu  $25 \text{ kN/m}^3$  içsel sürtünme açısı  $40^\circ$  ve kohezyonu ise  $1 \text{ MPa}$  olarak ölçülmüştür [8].



Şekil 7. Aescher tünelinin zemin profili [3]



Şekil 8. Buzul morenin tane büyüklüğü grafiği [10]

Bıçak kalkan kullanımında çok büyük deformasyonlar ile karşılaşıldığından literatürde oldukça sık rastlanan [3,6,13,7,14,8,10] kanopi formlu şemsiye jet-grout destek sistemi bu tünelde kullanılmıştır.

## 2.2. Jet-Grout Kolonlar

Jet-grout tekniği, düşük geçirgenliği bulunan zeminlerde kimyasal enjeksiyon uygulamasına alternatif olarak zemin ile kimyasal karışımın karıştırılması ile zeminin iyileştirilmesine imkan sağlamaktadır.

Zemin tipine duyarlı olan geçirimsizlik enjeksiyonuna (permeabilite enjeksiyonu) nazaran, jet-grout tekniği hemen hemen her ince taneli zemin için kullanılabilir [3]. Jet-grout kolon üretimi sırasında ilk olarak kolon derinliğine kadar çelik uç iletilir daha sonra, önceden belirlenmiş basınç ile harç ve zemin karıştırılarak jet-grout kolonlar oluşturulur [15].

Jet-grout kolonlar; üst yapıdan temele gelen yükü taşıma, kazı esnasında ortaya çıkan yanal zemin kuvvetlerini karşılama gibi birçok alanda kullanılabilir [16]. Jet-grout yönteminin hemen hemen her türlü zemine istenilen derinlikte uygulanabilmesi, jet-grout kolon uygulamasının ön plana çıkmasını sağlamaktadır [15].

Şekil 3'te görüldüğü üzere 39 adet jet grout kolonu, tünel sisteminde zemine 11°'lik açı ile entegre edilmiştir. Jet grout kolon boyları 13 m ve kolonlar arası mesafe 450 mm olarak belirlenmiş olup her bir kolonun çapı 600 mm olacak şekilde jet grout kolon sistemi tasarlanmıştır. Her bir ano 11 m olduğundan kolonlar için 2 m bindirme mesafesi bırakılmıştır. Arın kazısından sonra 200 mm kalınlığında püskürtme beton ve hasır takviyesi yapılmıştır. Jet-grout kolonlar aşamalı olarak zemine inşa edilmiştir. Şekil 4(b)'de numaralandırılan kolonlardan öncelikle 14-26 nolu kolonlar, daha sonra 27-39 nolu kolonlar ve son olarak ise 1-13 nolu kolonlar inşa edilmiştir. Oluşturulan bu jet-grout kolonlar için kullanılan parametreler Tablo 1 [8]'de verilmiştir.

Tablo 1. Jet-grout kolonlar için kullanılan parametreler [8]

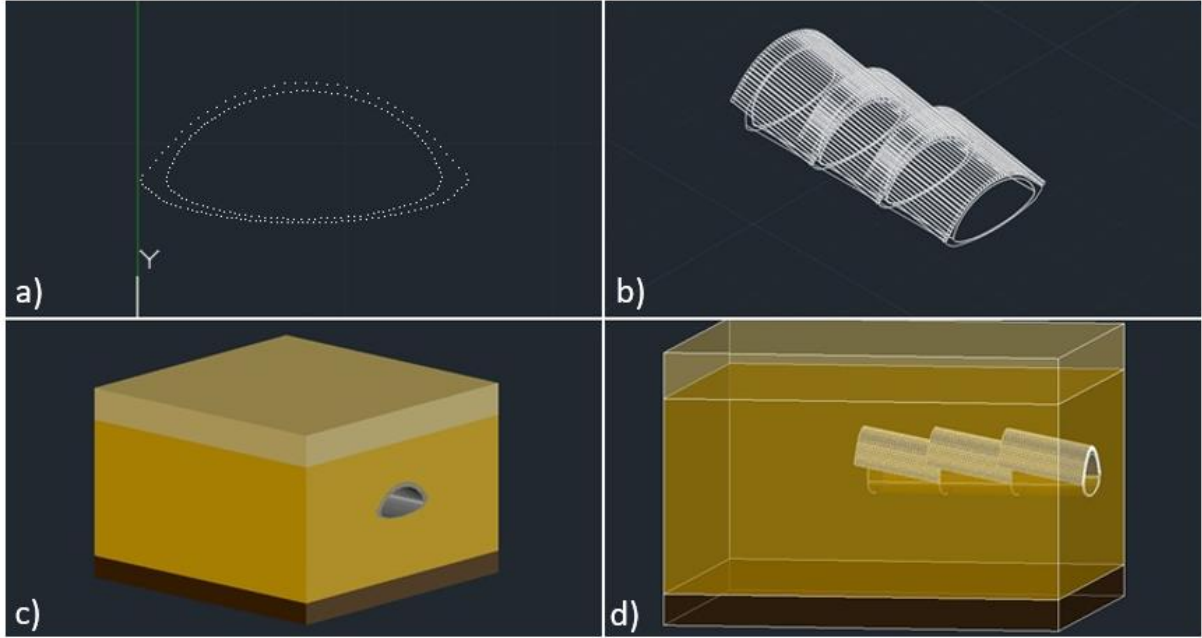
Parametreler	Değerler
Pompa Basıncı	40 MPa
Su:Çimento Oranı	1:1
Delici Çubuğun Dönüş Miktarı	15 rpm
Delici Çubuğun Geri Çekilme Hızı	0,5 m/min
Enjeksiyon Oranı	12 m <sup>3</sup> /h

## 2.3. Modelleme ve Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi

Bu çalışma kapsamında Aescher tünelinin üç boyutlu modellemesi AutoCAD 2021 [20] yazılımı ile yapılmıştır. Son dönemlerde literatürdeki çalışmalarda sıklıkla karşılaşılan (örneğin; [21-23]) ve bu çalışmada tünel destek sistemleri olarak kullanılan jet-grout kolonları gerçeğe oldukça yakın bir biçimde her ayrıntı dikkate alınarak orijinal boyutlarıyla modellenmiştir. Karmaşık yapıdaki tünel destek sistemi olan jet-grout kolonlarının 3B SE analizine uygun bir biçimde

modellenmesi için yakınsama çalışması yapılmıştır. Tüm katı modelin sorunsuz bir şekilde sonlu elemanlar analizi yapılacak programa aktarılması için en uygun format belirlendikten sonra katı model dışarı aktarılmıştır. Dışarı aktarılmış olan katı modelin tüm parçaları Abaqus [17] programında sonlu elemanlar analizine tabi tutulmak üzere içeri aktarılmıştır. İçeride aktarılan tüm parçaların geometrik kontrolleri yapıldığında sonlu elemanlar ağlarına bölünebilme durumu değerlendirilmiştir. Modelin analiz öncesi ön kontrol işlemleri tamamlandıktan sonra Abaqus [17] programı ile üç boyutlu sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 9'da tasarlanan modelin AutoCAD [20] ortamındaki üç boyutlu görüntüleri verilmiştir. AutoCAD [20] programında hazırlanan modelde ilk olarak kanopi form elde edilmiştir. Bunun için Coulter [1] tarafından raporlanan ve Şekil 4(b)'de de görülen tünelin profil görüntüsünün ölçekli halinden yararlanılmıştır.

Verilen ölçekleme görüntüsü üzerinden çeşitli yazılımlar aracılığıyla ilgili koordinatlar okunmuştur. Okunan koordinatlar AutoCAD [20] programında birleştirilerek kanopi form oluşturulmuştur. Aynı kesit kullanılarak jet-grout kolonların merkezleri belirlenip kolonların merkez koordinatları alınmıştır. Şekil 5'te gösterilen model dikkate alınarak 13 metrelik jet-grout kolonları ve 11 m uzunluğundaki anolar katı halde modellenmiştir. Basel yönündeki tünelin yaklaşık 32 ile 33. metrelik kısmı arasında en büyük oturmanın gözlemlenmesinden dolayı [1] ilgili bölgede yer alan 3 adet ano seçilip modellenmiştir. AutoCAD [20] programının üç boyutlu modelleme kısmı kullanılarak zemin katı modeli oluşturulduktan sonra her bir ano oluşturulan katı modelden çıkartılarak modelleme tamamlanmıştır. Modelleme aşamaları tamamlandıktan sonra AutoCAD [20] programında dışa aktarma komutu ile ACIS dosyası olarak model dışa aktarılıp bu dosya ile Abaqus [17] programına model taşınmıştır. Modelleme aşamaları Şekil 9'da sunulmuştur.



**Şekil 9.** Yapılan üç boyutlu modelin AutoCAD [20] programındaki görünüşleri; a) kanopi formun koordinatlarının AutoCAD [20] programına aktarılması, b) kolonlar ve anoların üç boyutlu görüntüleri, c) katı zemin modelinden iç kısmın çıkarılmış durumu, d) hazırlanan kolonlar ve anoların zemin içerisindeki görüntüleri

Hazırlanan modelin üç boyutlu sonlu elemanlar analizini yapmak için model Abaqus [17] programına aktarılmıştır. Abaqus [17] programına aktarma işlemi yapıldıktan sonra Tablo 2 [8]'de verilen zemin, jet-grout kolon ve püskürtme beton parametreleri tanımlanmıştır. Modelin hatasız analiz edilebilmesi için oluşturulan model birleştirilmeden ayrı parçalar halinde aktarılarak bu parçalar Abaqus [17] programında birleştirilmiştir. Tünel destek sistemlerinin ve kazı aşamalarının inşasının modellenebilmesi için analiz çözüm adımları tanımlanmıştır. Her bir adımda anoların kazımını tanımlayabilmek için başlangıç adımı haricinde toplamda 3 farklı adım tanımlanmıştır. Kazı aşamalarıyla birlikte her adımda tünel destek sistemlerinin entegrasyonu da sağlanmıştır. 3B SE modelinde her bir ano ayrı parçalar halinde bulunduğu için kazı aşamaları tanımlanırken ilgili parçaların gerekli adımlarda deaktif olması Abaqus [17] programında yer alan model değişimi özelliği kullanılarak sağlanabilmektedir. Model değişimi yönteminde ilk anonun kazılması için birinci analiz adımı kullanılmıştır. İlk adımda sadece birinci anonun kazım aşaması gerçekleşeceğinden ilk anonun iç kısmı bu adımda deaktif edilmiştir. İkinci adımda ise ilk ano ve ikinci anonun kazılacak kısımları tanımlanmıştır. Son adımda 3 anonun da iç kısımları deaktif edilerek kazı aşamasının tamamlanması sağlanmıştır. Her ano kazısından sonra ilgili püskürtme beton ve jet grout uygulamaları modelde aynı anda aktif edilmiştir.

Tünel destek sistemlerinin inşa aşamalarının modele entegrasyonu kompleks bir problem olduğundan Abaqus [17] programında yer alan standart işlevlerin dışına çıkılarak kodlama sistemi kullanılmıştır. Analiz adımlarına bağlı materyal

değişim sistemi, tünel destek sistemlerinin inşa aşamalarını modele yansıtmak için kullanılmıştır. Modeldeki adımlara bağlı olarak belirlenen materyal değişim noktaları ve materyal özellikleri Abaqus [17] programının standart arayüzünde yer alan mevcut sistem kullanılarak tanımlanmıştır. Ancak analiz adımlarının hangi aşamasında materyal değişiminin gerçekleşeceğiyle ilgili tanımlama için kodlama sistemine gerek duyulmuştur. Bunun için Abaqus [17] programında analiz başlatılmadan önce modelin iş dosyası oluşturularak Python [18] tabanlı bir kod dosyası elde edilmiştir. Bu dosya kodlama sisteminde açılarak analiz adımları ve materyal bölümünde gerekli olan işlemler kodlanmıştır. Model analiz edilirken kodlama sisteminde değişiklik yapılmış girdi dosyası kullanılarak tünel destek sistemlerinin inşa aşamaları sisteme entegre edilmiştir. Böylece model değişim sistemi ve kodlama ile güncellenmiş girdi dosyası kullanılarak hem kazı aşamaları hem de tünel destek sistemlerinin inşa aşamaları gerçek duruma uygun bir biçimde analize yansıtılmıştır. Kazı aşamaları ve tünel destek sistemlerinin entegrasyonu tanımlandıktan sonra modeldeki parçaların birbirleriyle ilişkili bağlantıları oluşturulmuştur. Tünel sisteminin gerçek durumu gözetilerek zemin tabakaları, püskürtme beton uygulaması yapılan kısımlar ve jet-grout kolonları 3B SE analize uygun olacak şekilde Abaqus [17] programında birbirlerine bağlanmıştır. Parçalar arası bağlantı kurulurken yüzeyden yüzeye temas seçeneği kullanılmış olup ana yüzey-bağımlı yüzey seçimleri yapılarak yüzeyler arası etkileşim modele dahil edilmiştir. Her bir bağlantı sırasında analiz iterasyonlarının sorunsuz ilerleyebilmesi için bağlantı yüzeylerinin başlangıç konumlarına getirilme ayarları özelleştirilmiştir.

Abaqus [17] programında oluşturulan 3B SE modeline her bir katmanın birim hacim ağırlığı kullanılarak zemin gövde yükü tanımlaması yapılmıştır. Tablo 2'de de gösterildiği üzere kum tabakası için  $19 \text{ kN/m}^3$ , buzul moren tabakası için  $22 \text{ kN/m}^3$  ve molas tabakası için  $25 \text{ kN/m}^3$  birim hacim ağırlık değerleri zemin gövde yükü tanımlaması için kullanılmıştır. Kullanılan bu yükleme sistemine uygun olarak zeminin efektif gerilmelerini de hesaba katabilmek için yükleme kısmının bir diğer modülünde yer alan geostatik stres tanımlaması işlemi modele uygulanmıştır. Geostatik stres tanımlamasını uygun bir biçimde yapabilmek için modelin sol üst köşesi, üç boyutlu analiz sisteminde orijin noktasına taşınmıştır. Daha sonra her katman için efektif gerilme tanım aralığı programa girilmiştir. Abaqus [17] yazılımı girilen efektif gerilme tanımlamasını kullanarak tüm ara noktalar için efektif gerilme hesaplarını yapmaktadır. Yükleme kısmı tamamlandıktan sonra sınır şartları modele tanımlanmıştır. Sınır şartlarının tanımlanması aşamasında mesnetlerin konumlandırılacağı yerle ilgili analiz sınır şartlarından etkilenmemesi için yakınsama çalışması gerçekleştirilmiştir. Modelin taban kısmı ankastre olacak şekilde tüm yönlerde dönme ve deformasyona karşı sınırlandırılmış olup bütün yan yüzlerde sadece düşey yöndeki deformasyon serbest bırakılmıştır.

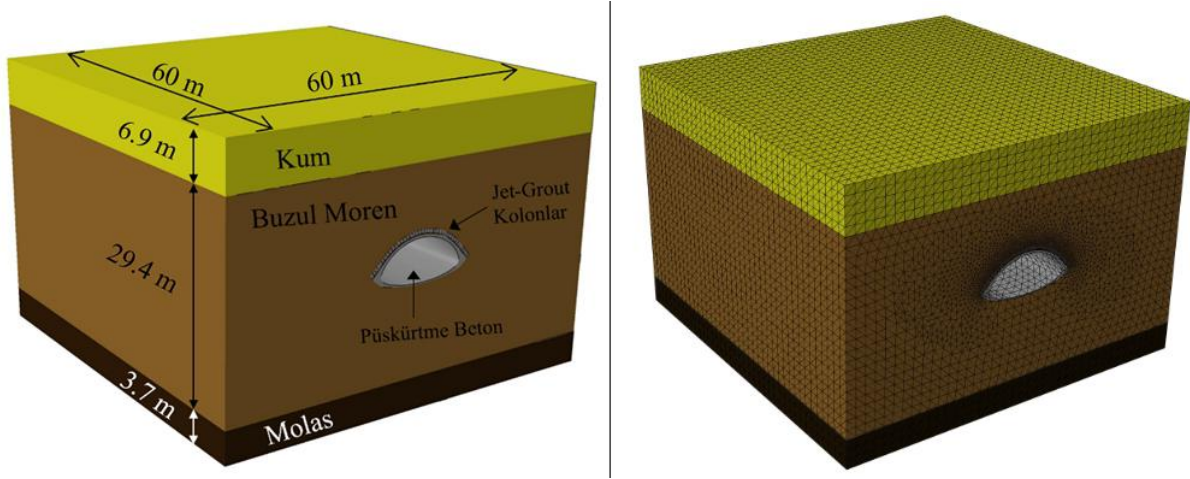
Son aşamada üç boyutlu sonlu elemanlar analizi için model ağ elemanlarına (mesh) bölünmüştür. Oluşturulan modelde kritik noktalarda gerekli mesh sıkılaştırmaları otomatik olarak yapılmıştır. Karmaşık yapıda olan model kısımlarını sorunsuz bir şekilde ağ elemanlarına bölebilmek için dört üçgen yüzlü (tetrahedron) elemanlar kullanılmıştır. Hazırlanan modelde dış zemindeki dikdörtgen forma nazaran jet-kolonların olduğu bölgelerde ağ elemanlarına bölme işlemleri için kompleks yapılar yer aldığından standart ağ elemanlarına bölme işlemi kullanılamamıştır. Bu nedenle zemin üç boyutlu sonlu elemanlar ağlarına bölünmeden önce eleman biçimleri hex formdan dört üçgen yüzlü forma dönüştürülmüştür. Bu sayede ağ modeli program tarafından oluşturulurken özellikle dairesel kısımlarda ağ sıkılaştırmaları yapılabilmektedir. Ağ elemanlarına bölme işlemi tamamlandıktan sonra model hem geometrik hem de malzeme açısından nonlineer olarak analiz edilmiştir.

Nonlineer analiz sistemi kullanıldığından analiz esnasında çeşitli yakınsama problemleri ile karşılaşmıştır. Bu durum analiz çıktılarının hesabında kullanılan iterasyonlar ile ilişkilidir. Üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemlerinde temel felsefe belirlenen sınır şartları çerçevesinde belirli modeli ve/veya modelleri daha küçük parçalara bölerek küçük parçaların çözümünden ana parçaya entegrasyon yapmaktır. Bu yöntemle yapılan nümerik analizlerde karmaşık denklemler ve çok sayıda dikkate alınan parametre ile nihai sonuçlara ulaşılmaktadır. Gerçeğe uygun modellemelerde fazla sayıda ayrıntının hesaplara dahil olması doğal olarak denklemlerdeki bilinmeyen sayısını arttırmaktadır. Çözümlemeler daha karmaşık olduğundan çeşitli denklem sistemlerinde iterasyon aşamalarında tıkanmalar yaşanabilmekte ve dolayısıyla analizler oldukça uzun sürebilmektedir. Abaqus [17] programında yapılan analizlerde karşılaşılan yakınsama hataları, analiz esnasında Abaqus [17] programı tarafından oluşturulan mesaj dosyasında görüntülenebilmektedir [17]. Bu çalışma kapsamında oluşan yakınsama problemleri belirli aralıklarla kontroller yapılarak takip edilmiş ve analiz sistemi karşılaşılan hatalara bağlı olarak iyileştirilmiştir. Program tarafından verilen uyarılar doğrultusunda ilgili düzenlemeler yapılarak analiz başarıyla tamamlanmıştır.



**Tablo 2.** Üç boyutlu sonlu elemanlar analizinde kullanılan malzeme parametreleri [8]

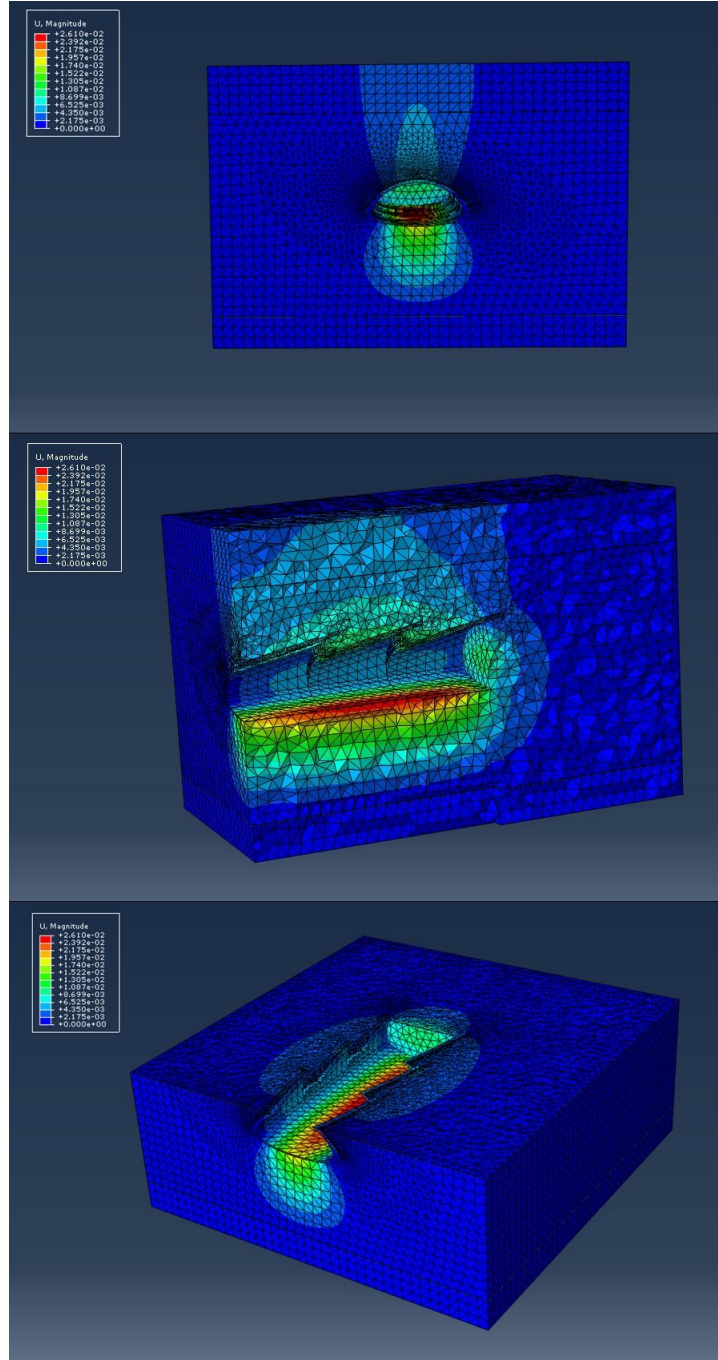
Malzemeler	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$E$ [MPa]	$\nu$ [-]	$c'$ [MPa]	$\phi'$ [°]
Kum	19	35	0.2	0.015	30
Buzul moreni	22	80	0.2	0.020	40
Molas ana kayası	25	2000	0.2	1	40
Jet grout kolonlar	22	900	0.2	1.3	35
Püskürtme beton örtü	25	30000	0.2	-	-

**Şekil 10.** Aescher tünelinin üç boyutlu modelinin boyutları ve mesh görünümü

### 3. Bulgular

Bu çalışma kapsamında analizi gerçekleştirilen Aescher tünelinin sahadaki inşa aşamalarında, jet grout destek sistemi imal edildikten sonra ilk ano kazılıp ardından kazılan bölgeye püskürtme beton uygulaması yapılmıştır. Diğer anolar için de benzer bir yol izlenmiştir. Gerçek durumla uyumlu olabilmesi açısından yapılan üç boyutlu sonlu elemanlar analizinde de aynı adımlar modele tanımlanmıştır. Her bir ano modelde ayrı parçalar olarak tasarlandığından kazı aşamalarının modele yansıtılması için ano katı model parçalarının belirlenen aşamalarda deaktif olması sağlanmıştır. Gerçek uygulamaya oldukça benzer şekilde yapılan analizin son adımında 3 ano da deaktif edilerek kazı aşamasının tamamlanması sağlanmıştır. Tünel destek sistemlerinin inşa aşamaları, kazı aşamalarıyla birlikte modele entegre edildiğinden bu tip kompleks bir problemin çözülmesi için Abaqus [17] yazılımının kodlama modülünden yararlanılmıştır. Malzeme değişim sistemi, tünel destek sistemlerinin inşa aşamalarını modele yansıtmada başarılı sonuçlar vermiştir. Modelin girdi dosyasının kodlama sisteminde açılabilir formatta olması analiz adımlarının ve materyal bölümündeki değişimlerin sisteme aktarılmasında fayda sağlamıştır.

Gerekli işlemlerin hassas bir şekilde yapılmasıyla Aescher tünelinin 3B SE analizi Abaqus [17] yazılımı kullanılarak gerçek duruma uygun bir biçimde tamamlanmıştır. Şekil 11'de tamamlanan nümerik analizin deformasyon değerleri (metre cinsinden) ve modelde oluşan deformasyon bölgeleri sunulmuştur. Analiz sonucunda, maksimum oturma miktarı 26.10 mm bulunmuş olup bu değer ilk olarak Coulter [1], devamında Coulter ve Martin [8] sonrasında Barla ve Bzowka [10] tarafından rapor edilmiş olan yaklaşık 25-26 mm aralığındaki gerçek ölçüm sonucu ile oldukça uyumludur.

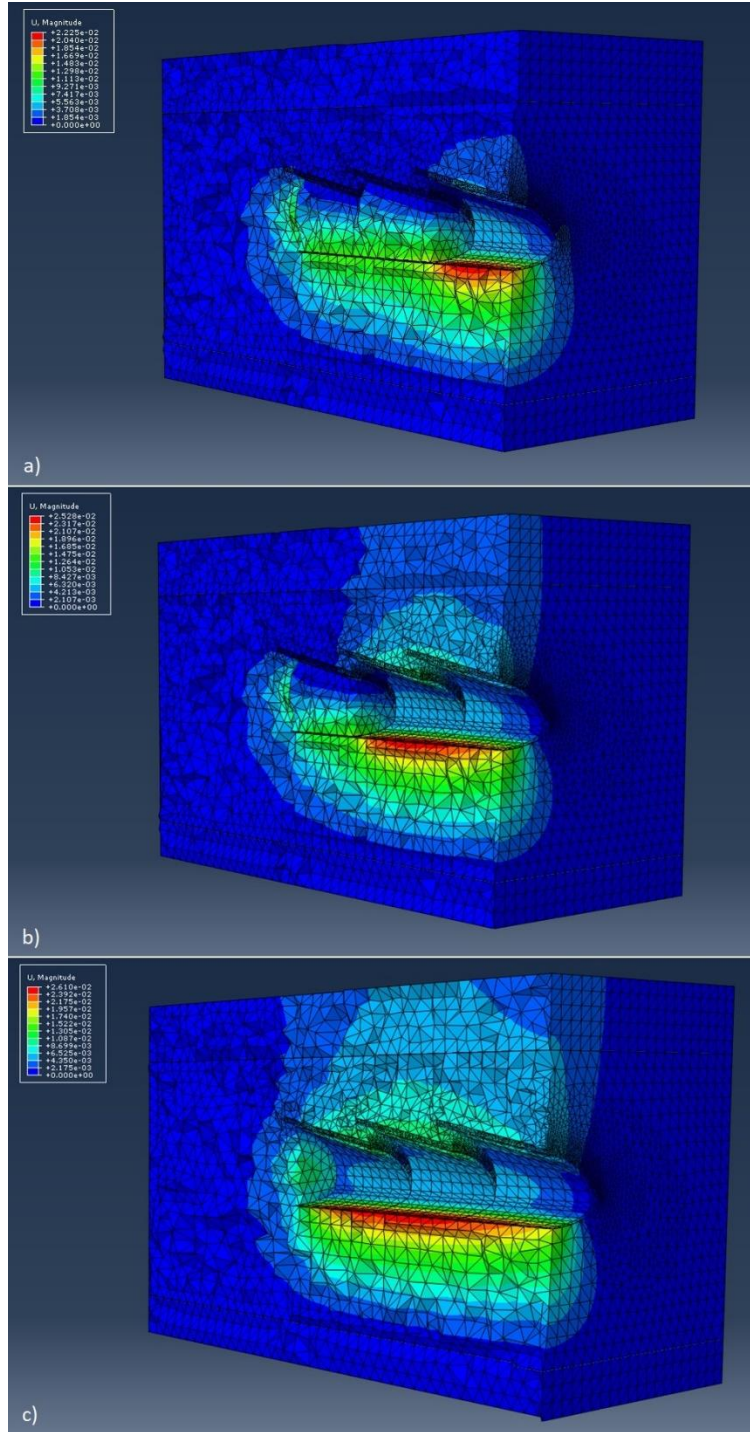


**Şekil 11.** Aescher tünelinin üç boyutlu sonlu elemanlar modelinin oturma sonuçları ve deformasyon bölgelerinin görünümü

Aescher tüneliyle ilgili yapılmış diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmadaki analizde kazı aşamaları ve tünel destek sistemlerinin inşa aşamalarının analize entegrasyonu sağlanmıştır. Bu kapsamda analizin başlangıç adımı sonrasındaki birinci adımında ilk ano kazımının gerçekleştirilmesi, ilgili bölgeye püskürtme beton ve jet-grout kolonlarının uygulamasıyla Şekil 12.a'da gösterildiği üzere 22.25 mm'lik bir oturma olacağı belirlenmiştir. Analizin ikinci adımında, ilk anodan sonra ikinci ano kazımının da gerçekleştirilmesi, ilgili bölgeye püskürtme beton ve jet-grout kolonlarının uygulamasıyla Şekil 12.b'de gösterildiği üzere 25.28 mm'lik bir oturma değerine ulaşılabileceği sonucuna varılmıştır. Analizin son adımında ise ilk ve ikinci anodan sonra üçüncü ano kazımının da gerçekleştirilmesi, ilgili bölgeye püskürtme beton ve jet-grout kolonlarının uygulamasıyla Şekil 12.c'de gösterildiği üzere nihai olarak 26.10 mm'lik bir oturma gerçekleşeceği belirlenmiştir. Şekil 12'de her bir kazı aşamasında oluşan deformasyon bölgeleri gösterilmiştir.

Üç boyutlu sonlu elemanlar analizi sonucunda maksimum deformasyon bölgesi tünelin merkez hattından 32 metre uzaklıkta bulunmuştur. Her analiz aşamasında elde edilen maksimum deformasyon bölgelerinin beklenen alanlarda konumlandığı görülmüştür. Son analiz adımı sonrası ulaşılan 26.10 mm'lik maksimum oturma değerinin gerçek ölçüm

sonuçlarıyla oldukça uyumlu olması modelin hassasiyetini ve gerçek duruma yakın bir analizin yürütüldüğünü doğrulamaktadır.



Şekil 12. Her bir anonun kazım aşamasında ortaya çıkan deformasyon bölgeleri; a) Ano 1 b) Ano 2 c) Ano 3

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, İsviçre'nin Zürich kentinde yer alan Aescher tünel örneğinin temel alındığı analizde kazı aşamalarıyla birlikte tünel destek sistemlerinin inşa aşamalarının belirtilen tekniklerle modele yansıtılması, Aescher tüneliyle ilgili yapılmış 2B ve 3B sonlu elemanlar analizi konulu diğer çalışmalardan farklı olarak gerçek duruma daha yakın bir biçimde simülasyonların gerçekleştirilmesini sağlamıştır. Analiz sonucunda, maksimum oturma miktarı 26.10 mm bulunmuş olup gerçek boyutlarıyla modellenen jet-grout kolon destek sistemi ve kazı aşamalarının tünel inşa sürecindeki ilerleyişi de göz önüne alındığında yüzey oturmalarının yalnızca belirli bir alanda olduğu ve jet-grout destek sisteminin düşey yöndeki oturmayı büyük ölçüde önlediği gözlemlenmiştir. Analiz sonrası nihai durumda ulaşılan 26.10 mm'lik maksimum oturma değerinin ve deformasyon bölgelerinin gerçek ölçüm sonuçlarıyla oldukça uyumlu olması, bu çalışmada kullanılan tekniklerin geçerliliğini gösterir niteliktedir.

Ayrıca sunulan analiz sonuçlarından görüleceği üzere kazı aşamalarıyla birlikte tünel destek sistemlerinin inşası ve kazı aşamalarının da modele yansıtılması, tünel inşa sürecindeki deformasyonları aşama aşama incelemeyi sağlamaktadır. Böylece tünel inşa aşamalarında oluşabilecek anormal deformasyonların önceden belirlenip gerekli önlemlerin alınması sağlanabilir. Bu kapsamda özellikle anormal deformasyon oluşabilecek destek yapıları kullanılan karmaşık tünel sistemlerinin, bu çalışmada önerilen tekniklerle kazı ve destek yapılarının inşa aşamaları dikkate alınarak üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmesinin uygun olacağı kanısına varılmıştır.

#### Kaynakça

- [1] Coulter S. 2004. In fluence of tunnel jet-grouting on ground deformations at the Aescher tunnel, Univesity of Alabama, Phd tesis, 1-149, Switzerland.
- [2] Mair, R. J., Taylor, R. N. 1997. Bored tunneling in an urban enviroment. 14th International Conference on soil Mechanics and Foundation Egeineering, Hamburg, A.A. Balkema, pp. 2353-2385
- [3] Attwell, P. B., Hurrel, M. R. 1985. Settlement development caused by tunneling in soil. Ground Engineering 18(8): pp. 17-20
- [4] Bruce, D. A., Boley, D. L., Gallavresi, F. 1987. New developments in ground reinforcement and treatment for tunneling. Proceedings – 1987 Rapid Excavation and Tunneling Conference, New Orleans, LA, USA, Society of Mining Engineers, Inc., pp 811-835
- [5] Lunardi, P. 2000. The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation of rocks and soils. Tunnels and Tunneling International (Special Supplement), 3-30
- [6] Mussger, K., Koining, J., Reischl, S. 1987. Jet grouting in combination with NATM. Proceedings – 1987 Rapid Excavation and Tunneling Conference, New Orleans, LA, USA, Society of Mining Engineers, Inc., pp. 292-308
- [7] Pelizza S., Peila D., "Soil and rock reinforcements in tunnelling", Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 8, Issue 3, Pages 357-372, July 1993.
- [8] Coulter, S., Martin, C. D. 2006. Effect of jet-grouting on surface settlements above Aeschertunnel, Switzerland, Tunnelling and underground space technology, Volume 21, Issue 5, Pages 542 – 553
- [9] Algin H.M., Ekmen A.B., Yenmez L., Gümüş V. 2017. Three Dimensional Deformation Analysis of Aescher (Zurich, Switzerland) Canopy Tunnel's Excavation Supported By Jet Grouting, 7. Geotechnical Symposium, Istanbul, 22-24 Nov.
- [10] Barla, M., Bzowka, J., "Comparing Numerical Alternatives to Model Jet Grouting in Tunnels", EJGE, Vol. 18, 2997-3008, 2013.
- [11] Fries, T. 2000. Ausfahrtstunnel Ristet – erfahrungen aus dem Lockergestainsvortrieb. Mettlungen der Schweizerischen gesellschaft fur Boden- und Felsmeckanik, Zurich, Societe Suisse de Mechanique des Sols et des Roches, pp. 33-38, in German

- [12] Kleboth, P. 2000. Die eologie im Bereich der Umfahung Birmensdorf. Mettielungen der Schweizerischen gesellschaft fur Boden- und Felsmeckanik, Zurich, Societe Suisse de Mechanique des Sols et des Roches, pp. 3-9, in German
- [13] Barla, G., Rabagliati U., Fidato C., Cavalli, T., “Observation and monitoring for the design of stabilization measures by the jet-grouting method at the Valsesia tunnel”, Proc. Gruppo Nazionale di Coordinamento per gli Studi di Ingegneria Geotecnica, Convegno di Monselice. Pp. 93-106, 1988.
- [14] Barla, G., “Tunnelling for Turin railway link”, Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, September 1997, Hamburg.
- [15] Brill, G.T., Burke, G.K., Ringen, A.R., 2003. A ten year perspective of jetgrouting: advancements in applications and technology. In: Johnsen, L., Bruce, D.A., Byle, M. (Eds.), Proceedings of the 3rd International Conference – Grouting and Ground Treatment, New Orleans, vol. 1 of Geotechnical Special Publication No. 120, American Society of Civil Engineers, pp. 218–235.
- [16] Durgunoglu, H.T., Kulaç, H.F., Oruç, K., Yıldız, R., Sickling, J., Boys, I.E., Altugu, T. ve Emrem C., 2003. A case history of ground treatment with jet grouting against liquefaction for a cigarette factory in turkey. Grouting and Grout Treatment, New Orleans, s. 1-9.
- [17] SYSTÈMES, D., 2014. Abaqus, version 6.14, USA
- [18] Python programing language, 2001. Delaware, USA.
- [19] Boulbes R.J. 2020. Troubleshooting Finite-Element Modeling with Abaqus, Fransa, 1-439
- [20] Autodesk, Autocad., 2021. Autocad Drawing, version 2021, USA.
- [21] Ataş, F. H. (2021). İnce daneli zeminlerin jet grout tekniği ile zemin iyileştirmesinin yapılabilirliğinin optimizasyonu. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 86s, Tekirdağ.
- [22] Mısır, G. (2020). Jet Grout yöntemi ile zemin iyileştirme ve deplasman tahmini: Vaka analizi. 290-299
- [23] Zhang, W., Li, Y., Goh, A. T. C., & Zhang, R. (2020). Numerical study of the performance of jet grout piles for braced excavations in soft clay. Computers and Geotechnics, 124, 103631.