T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İZMİR GÖZTEPE METRO İSTASYONU BÖLGESİNDEKİ FAY ZONUNDAN GEÇEN VE YENİ AVUSTURYA TÜNEL AÇMA YÖNTEMİ KULLANILARAK AÇILAN TÜNELİN RADYE TEMEL PERFORMANSINA ETKİSİ

Muhammed Şerif YOLUK

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2020

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
ÇİZELGELER DİZİNİ vi
SİMGELER DİZİNİ vii
1. GİRİŞ 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 4
3. MATERYAL VE YÖNTEM 13
3.1. Materyal 13
3.1.1. Tünel Açma Yöntemleri ve Temel Parametreleri 13
3.1.1.1. Tünelciliğin Tarihsel Anlamda Gelişimi 13
3.1.1.2. Tünel Tahkimat Elemanları 17
3.1.1.3. Tünel Açma Yöntemleri 28
3.1.1.4. NATM Tünel İnşaatı Aşamaları 42
3.1.1.5. NATM Kazısı Yapılırken Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar 45
3.1.2. İzmir Göztepe İstasyonu Civarındaki Zemin Parametreleri 47
3.2. Yöntem 50
3.2.1. Sonlu Elemanlar Metodu 50
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA 72
4.1. Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Modelleme 73
4.2. Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları ve Yorumlanması 78
5. SONUÇ ve ÖNERİLER 82
5.1. Sonuçlar 82
5.2. Öneriler 84
KAYNAKLAR 85
ÖZGEÇMİŞ 88

ÖZET

YÜKSEKLİSANS TEZİ

İZMİR GÖZTEPE METRO İSTASYONU BÖLGESİNDEKİ FAY ZONUNDAN GEÇEN VE YENİ AVUSTURYA TÜNEL AÇMA YÖNTEMİ KULLANILARAK AÇILAN TÜNELİN RADYE TEMEL PERFORMANSINA ETKİSİ

Muhammed Şerif YOLUK

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Halil Murat ALGIN
Yıl: 2020, Sayfa: 89

Artan nüfus ile birlikte ortaya çıkan ulaşım, içme suyu gibi ihtiyaçların karşılanmasına yönelik olarak şehir merkezlerinde son zamanlarda tünel inşa etme tercihleri ve zorunluluğu doğmaktadır. Bu tür geoteknik uygulamalarda tünellerin mevcut yapılara olan etkisi önem arz etmektedir. Bu tez çalışmasında kritik bir zemin ortamı olan bir fay zonundan geçen tipik bir NATM tünelinin üzerindeki radye temel yapısına olan etkisi üç boyutlu (3B) sonlu elemanlar (SE) analizi kullanılarak incelenmiştir. Çeşitli algoritmalar kullanılarak oluşturulan 3B SE modelindeki fay zonu, NATM tünel ve radye temel etkileşimleri literatürde yapılmış çalışmalar dikkate alınarak gerçeğe uygun bir şekilde tasarlanmıştır. Bu kapsamda, İzmir metro güzergahındaki Göztepe İstasyonu civarındaki fay zonu, NATM tüneli ve radye temel yapısı dikkate alınmıştır ve bu kapsamda yapılan 3B SE analiz sonuçları çalışmada sunulmuştur. 3B SE analizinde inşa sonrası durum dikkate alınmış olup efektif zemin parametreleri kullanılmıştır. 3B SE modelinin boyutu, ağ sayısı, sınır şartları gibi parametreler yakınsama analizleriyle belirlenmiştir. Böylelikle fay zonu, NATM tünel sistemi ve radye temelden oluşan bu tür bir karmaşık geoteknik tasarımın ve karşılıklı etkileşimlerin üç boyutlu olarak gerçek boyutlarıyla modellenebileceği gösterilmiş ve analiz sonuçları sunulmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Tünel kazısı, NATM, Radye temel, Fay zonu, Üç boyutlu sonlu elemanlar analizi

ABSTRACT

MSC THESIS

THE EFFECT OF THE TUNNEL CONSTRUCTED USING THE NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD WITHIN THE FAULT ZONE IN İZMİR GÖZTEPE METRO STATION REGION ON THE RAFT FOUNDATION PERFORMANCE

Muhammed Şerif YOLUK

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Halil Murat ALGIN
Year: 2020, Page: 89

Due to the requirements derived from the increasing population in urban areas emerged in the form of transportation, drinking water etc., the utilisation of underground structures are inevitable. Therefore, the construction of tunnels and their impact on the existing structures become an important issue. In this thesis, the effect of NATM tunnel passing through the fault zone under a raft foundation was investigated by using three-dimensional (3D) finite element (FE) analysis. The effect of the fault zone on NATM tunnel and the raft foundation was introduced to the 3D SE model constructed using various algorithms. In this context, the fault zone, NATM tunnel and raft foundation near Göztepe Station in Izmir metro line was considered and the numerical results were presented based on the 3D FE analysis. In the 3D FE model, the post-construction stage was considered and the effective soil parameters were used. Parameters such as size, number of elements and boundary conditions of the 3D FE model determined based on the convergence studies. The results indicated that the combined model and 3D FE analysis is possible for this complex geotechnical design including the NATM tunnel system, the fault zone and the raft foundation.

KEY WORDS: Tunnel excavation, New Austrian Tunneling Method, Raft foundation, Fault zone, Three dimensional finite element analysis

TEŞEKKÜR

Hazırlamış olduğum yüksek lisans tez çalışmam süresince bana göstermiş olduğu anlayışından ötürü engin bilgi ve tecrübesinden yararlandığım danışmanım Sn. Prof. Dr. Halil Murat ALGIN hocama teşekkürlerimi sunuyorum. Çalışmam kapsamında 3B SE analizi çalışmalarımda desteklerinden ötürü Arş. Gör. Arda Burak EKMEN ve Arş. Gör. Egemen KAYA' ya teşekkür ederim. Hayatımın her anında bana güvenen ve her anlamda destekçim olan aileme de sonsuz teşekkür ederim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 3.1. Tünel enkesitinin gösterimi (Erguvanlı, 1984) 17
Şekil 3.2. Püskürtme betonun tünelin üstyarı kazısına uygulanması (Atasoy, 2010) 20
Şekil 3.3. Püskürtme betonun tünelin altyarı kazısına uygulanması (Atasoy, 2010) 20
Şekil 3.4. Tünel inşaatında hasır çelik ve iksa uygulaması (Selman, 2014) 23
Şekil 3.5. Tünel inşaatında kaya bulonu uygulaması (Selman, 2014) 24
Şekil 3.6. Tünel kazısı esnasında süren uygulaması (Selman, 2014) 25
Şekil 3.7. Tünel aynasının ilerlemesine göre boru kemer yönteminin şematik olarak görünümü (Kun, 2010) 26
Şekil 3.8. (a) Boru kemer yönteminin uygulanması, (b) Tünel aynasının jet grout kolonları ve boru kemer yöntemi ile stabilitesinin sağlanması (Kun, 2010) 27
Şekil 3.9. İzmir Metro Tüneli için önerilen ön sağlamlaştırma ve boru kemer yönteminin ölçeksiz en kesit görünümü (Kun, 2010) 28
Şekil 3.10. Tünel açma çalışmaları esnasında izlenecek yol (Bell, 1994 düzenlenerek) 30
Şekil 3.11. Kesitin solundaki pasif ve kalın olan tahkimat ile kesitin sağında NATM ile takviye edilmiş bölümün karşılaştırılması (Duffaut, 1996a) 34
Şekil 3.12. Takviye edilmiş yukarıda yer alan zemin kemeri ile kaya saplaması ve püskürtme betondan oluşan aşağıdaki tünel tahkimatı arasındaki benzerlik (Duffaut, 1996a) 35
Şekil 3.13. Yukarıda bünyesinde uzunlamasına yivler barındıran derin tünel, aşağıda ise sivri kemer biçimindeki yan galeriler (NATM' nin değişkenleri), (Duffaut, 1996a) 37
Şekil 3.14. Yeni İtalyan Yöntemi ve NATM' de (New Austrian Tunneling Method) kaya kütlesinin deformasyonunun karşılaştırılması (Kun, 2010) 40
Şekil 3.15. Tünel inşaatında kazı çalışmalarında kullanılan darbeli tünel açma makinesi (Kun, 2010) 42
Şekil 3.16. NATM uygulamasında aşamalı kazı - 1 (Selman, 2014) 43
Şekil 3.17. NATM uygulamasında aşamalı kazı - 2 (Selman, 2014) 43
Şekil 3.18. NATM uygulamasının tahkimat elemanlarının kesit görünümü (Polat, 2010) 45
Şekil 3.19. NATM uygulaması ile tünel inşaatında üç aşamalı kazı (Lunardi, 2008) 47
Şekil 3.20. Özel süren ve ankraj delgi makinesi (Lunardi, 2008) 47
Şekil 3.21. İzmir Metro Tüneli II. etap güzergahına ait uydu görüntüsü (Kun, 2010) 48
Şekil 3.22. Fay zonu çevresinde yer alan zeminin jeolojik yapısı ve tünel açma işlemi tamamlandıktan sonraki fayın durumu (Kun, 2010) 48
Şekil 3.23. Tünel aynasının çalışma bölgesinde yer alan jeolojik birimler (Kun, 2010) 49
Şekil 3.24. Sonlu elemanlar metodu tabanlı programın ara yüz ekranı 51
Şekil 3.25 Sonlu elemanlar metodu tabanlı programın ara yüzünde yer alan çalışma ağacı 52
Şekil 3.26. Dış ortamdan var olan bir modelin programa aktarılması 52
Şekil 3.27. Parts sekmesine tıklanarak model için kullanılmak üzere parça oluşturma 53
Şekil 3.28. Create part ikonuna tıklanarak model için kullanılmak üzere parça oluşturma 53
Şekil 3.29. Program üzerinde model için oluşturulan bir örnek 54
Şekil 3.30. Programda adım (step) oluşturma 55
Şekil 3.31. Programda adım (step) detaylandırma penceresi 55
Şekil 3.32. Program üzerinde yük tanımlama 56
Şekil 3.33. Yük tanımlama penceresi 56
Şekil 3.34. 'View Cut Manager' ikonuna tıklanarak açılan pencere 57
Şekil 3.35. Yükün etkitileceği yüzeyin seçimi 57
Şekil 3.36. Yük değerinin (magnitude) belirtildiği pencere 58
Şekil 3.37. Modelin sınır şartlarının oluşturulduğu başlangıç aşaması 58
Şekil 3.38. Sınır şartlarını oluşturma penceresi 59
Şekil 3.39. Program ara yüzünde sınır şartlarına ait yönlerin seçildiği pencere 59
Şekil 3.40. Malzeme tanımlanmasının ilk aşaması 60
Şekil 3.41. Malzeme özelliklerinin tanımlanması 61
Şekil 3.42. Parça için bölüm tanımlama 61
Şekil 3.43. Parça için oluşturulan bölümün malzeme tanımlaması 62

Şekil 3.44. Parça için bölüm tanımlaması yapılması 62
Şekil 3.45. Sonlu elemanlara bölme işlemi için verilerin girildiği pencere 63
Şekil 3.46. Sonlu elemanlara bölme işlemi tamamlanan parçanın görüntüsü 64
Şekil 3.47. Parçaların aynı pencereye toplanması 64
Şekil 3.48. Parçaların birleştirilmesi işlemi 65
Şekil 3.49. Interactions Properties ile etkileşim özelliği oluşturma 65
Şekil 3.50. Yüzeyler arasında sürtüneme değerinin girilmesi 66
Şekil 3.51. Etkileşim tanımlama 66
Şekil 3.52. Etkileşim türünün belirlendiği menü 67
Şekil 3.53. Kullanılan programda job (iş) oluşturma 67
Şekil 3.54. İş (job) oluşturma penceresi 68
Şekil 3.55. Analiz ayarlarının oluşturulması 68
Şekil 3.56. Analiz işleminin başlatılması 69
Şekil 3.57. Analizin sürdüğünü gösteren metin 69
Şekil 3.58. Analizin sonlandığını gösteren uyarı 70
Şekil 3.59. Örnek analiz sonuçları göstergesi 70
Şekil 3.60. Analiz sonuçlarının program dışı ortama aktarılması 71
Şekil 4.1. İzmir Metrosu Göztepe İstasyonu tünel en kesiti (Kun, 2010) 73
Şekil 4.2. NATM tüneli, zemin modeli ve fay zonunun sonlu elemanlar ağının gösterimi 76
Şekil 4.3. İlgili program üzerinde tünele etki eden yükün tanımlanması 76
Şekil 4.4. Sınır koşulları tayin edilmiş zemin modeli 77
Şekil 4.5. Sonlu elemanlara bölme işlemi tamamlanmış zemin modeli 78
Şekil 4.6. Analizin başlatılması 78
Şekil 4.7. 0.071 MPa basınç değerine karşılık gelen oturmalar 79
Şekil 4.8. 3B SE modelinin zemin-radye temel-tünel etkileşimli statik analizi 80
Şekil 4.9. 3B SE analizinden elde edilen tünel ve çevresinin ağ yapısı 80
Şekil 4.10. 3B SE analizinden elde edilen tünel kesiti 81
Şekil 5.1. NATM tünelinde meydana gelen oturmalar 83

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. Geçmiş dönemlerden günümüze kadar gelen bazı tüneller ve özellikleri. (Köse ve diğer., 2007'den düzenlenerek) 15
Çizelge 3.2. Tünel yapımında farklı araştırmacılar tarafından zayıf kaya tabakalarının tespit edildiği hallerde tavsiye edilen püskürtme beton kalınlığı (Torunoğlu, 2008 düzenlenerek) 21
Çizelge 3.3. Materyal özellikleri (Kun, 2010' dan düzenlenerek) 49
Çizelge 4.1. Radye temelin malzeme özellikleri (Kun, 2010' dan düzenlenerek) 74
Çizelge 4.2. Çalışma alanında yer alan zeminlerin özellikleri (Kun, 2010' dan düzenlenerek 74
Çizelge 4.3. Çalışma kullanılan diğer materyallerin özellikleri (Kun, 2010' dan düzenlenerek 75

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

σ_r	Radyal Gerilme (kN/m^2)
σ_V	Düşey Gerilme (kN/m^2)
σ_H	Yatay Gerilme (kN/m^2)
Pi	Plastik Zonda Tahkimata Etki Eden Tavan Basıncı (kN/m^2)
γ	Doğal Yoğunluk (kN/m^3)
E	Elastisite Modülü (MPa)
ν	Poisson Oranı
c'	Kohezyon
Φ'	İçsel Sürtünme Açısı (^{o})
λ	Yük Boşaltma Faktörü
3B SE	Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi
NATM	Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi
TBM	Tünel Açma Makinesi
JGC	Jet Grout Kolonu
IBO	Kendinden Delen Bulon
AÇTM	Amerikan Çelik Tahkimat Metodu

1. GİRİŞ

Çağımızda giderek artan nüfus beraberinde günlük hayatta insanların ihtiyaç duyduğu ulaşım, su, enerji vb. gereksinimleri de arttırmaktadır. Bu nedenle insanoğlu gereksinimlerini karşılamak üzere farklı metotlar üzerinde çalışarak çözüme ulaşmayı hedeflemiştir. Bu bilgilerden yola çıkarak baktığımız zaman çağımızda ulaşım, su, enerji vb. alanlarda tünel inşaatı çalışmalarına rastlamak kaçınılmazdır.

Gelişen dünya düzeninde beslenme ve barınma kadar ulaşım da vazgeçilemez bir yaşam şeklidir. Başta şehirde artan nüfus, beraberinde trafik yoğunluğunu arttırmakta, bu durum yapılabilirlik çerçevesinde ulaşım hizmetlerinin yeraltında güzergah oluşturmasını zorunlu kılmaktadır. Bu yüzden tünel vb. yer altı açıklıklarının tasarımı önem kazanmaktadır. Günümüzde karşılaşılan tüm inşaat çalışmalarında olduğu gibi, tünel inşaatlarında da tercih edilecek yöntemin teknolojik gelişimleri yakalaması, optimum maliyetle oluşturulması ve güvenilirliğinin maksimum seviyede olması gerekmektedir.

Teknolojinin gelişimiyle tünel inşaatında kullanılan geliştirilmiş makineler ve araç-gereçlerle tünel açma yöntemlerinde gelişmeler gözlenmektedir. Tünel inşaatı çalışmalarında yapı veya zemin şartlarından ötürü meydana gelebilecek beklenmedik haller ve şehir merkezi içerisinde yapılacak çalışmalarda zaman etkeni önem gösterilmesi gereken bir faktör olmuştur. Bu nedenle yapım teknikleri ile birlikte sayısal modellemelerin ehemmiyeti artmıştır.

Tüneller, kazı ve destek sistemine ihtiyaç duyulan yer altı açıklıkları olup çalışmanın gerçekleştirileceği arazideki kayaçların özelliklerinin ve davranışlarının önceden tespit edilmesi, sahada karşılaşılabilecek risklerin araştırılması; plan, etüt, proje, modelleme ve en nihayetinde uygulama aşamaları için elzemdir. Tünel inşaatı sırasında dikkat edilmesi gereken önemli bir faktör, tünelin inşaat alanında ve tünel güzergahında var olan yapılarda meydana gelebilecek deformasyonun minimuma

indirgenmesidir. Bu doğrultuda planlama ve uygulama esnasında gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir.

Tünel inşaatı çalışmalarında uygulamada gecikme ve noksanlıklara neden olan yer altı suyu seviyesi, ayrışmış kayaçlar ve fay zonları karşılaşılan başlıca problemlerdir. Bu sorunlar göz önüne alındığında, tünel inşaatı çalışmalarında teknolojinin etkisi arttıkça gözle görülür gelişmeler elde edilmektedir. Tünel inşaat alanının jeolojik yapısının araştırılmasının ardından tünel inşaatına geçilmektedir.

Toplumsal yaşam alanlarında yeni metro güzergahlarının oluşturulması ekseriyetle tünel kazısının apartmanlara, tarihi yapılara ve yeraltı tesisat yapılarına yakın bölgelerde yapılmasını icap eder. Yeryüzünde daha önceden bulunan yapılarda meydana gelebilecek hasarları doğru olarak belirlemek ve gerekli durumlarda önleyici tedbirler sağlamak amacıyla tünel inşa yöntemi ve tünelin oluşturulacağı güzergahın doğruca belirlenmesi inşaat mühendisliği bakımından oldukça önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında numerik analizler, araziden elde edilen deformasyon değerleri (Kun, 2010; Kun ve Onargan, 2013) ile karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda ulaşılan veriler kullanılarak faylı zonlarda ve zayıf yapıdaki kaya tabakalarında açılmış olan tünellerin mevcut civar yapılara etkisi İzmir Metro inşaatının Göztepe İstasyonu model alınarak araştırılmıştır. Bu çalışma ile ulaşılan sonuçlar diğer tünelcilik çalışmalarına da örnek teşkil edebilecektir.

Tez çalışmasında hem proje güzergahının jeolojik durumu hem de şehir merkezi içerisinde tünel inşaatı uygulamalarının önemli örneklerinden İzmir metro inşaatının Göztepe istasyonu güzergahı incelenmiştir. Çalışmada güçsüz kaya tabakaları ve faylı zonlar irdelenerek bu faktörlerin planlama ve uygulamadaki gereksinimler üzerindeki etkileri, meydana gelebilecek riskler ve alınacak tedbirler irdelenmiştir. Konuyla ilgili gerekli tüm bilgiler Kun (2010), Kun ve Onargan (2013) tarafından sunulmuştur.

Çalışmada fay zonundan geçen NATM tünelinin radye temel performansına etkisi üç boyutlu (3B) sonlu elemanlar (SE) yöntemi kullanılarak irdelenmiştir. Kun'

un 2010 yılında hazırlamış olduğu çalışma dikkate alınarak 3B modelleme gerçekleştirilmiştir. Değişik tünel kesitleri göz önüne alınarak tünel inşaatında kazı çalışmalarına başlanılmadan önce, ulaşılan saha çalışmaları ve laboratuvar sonuçları bilgisayarda 3B SE yöntemiyle oluşturulan modele eklenerek, tünele etki edecek yükler, tünel kesitlerinde ve zeminde oluşabilecek riskli alanlar incelenmiştir. 3B SE analizleri ile ulaşılmış olan sonuçlardan hareketle bu tez İzmir Göztepe Metro İstasyonu bölgesindeki fay zonundan geçen ve Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi kullanılarak açılan tünelin radye temel performansına etkisi incelenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Coulter ve Martın (2005), Aescher tünelinin, buzullu mera ve Molasse ana kayalarında kazılmış, büyük, sığ, dairesel olmayan bir tünel olduğundan bahsetmişlerdir. Kazıların buzullu meralarda olduğu bölümlerinde, inşaat prosedürü olarak, kazı desteği için tünel yüzeyinin önündeki bir jet grout kemerinin kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Püskürme işlemi sırasında alınan ölçümler ve tünel başlığının kazılması, geleneksel NATM tünel açma yöntemleri kullanılarak gözlemlenenden çok daha dar bir yerleşim yeri ortaya çıktığına işaret etmişlerdir. Hacim kayıplarını % 0.35 ile sınırlandırmışlardır. Bu kaybın yaklaşık olarak bulamaç kalkanı ve EPB TBM tüneli ile elde edilen hacim kaybı olduğunu saptamışlardır. Jet-grouting kullanılan yüzey oturmalarında sayısal bir geri analiz gerçekleştirmişlerdir. Geri analiz, dar oturma sonuçlarının, jet-grout ile ilgili yüksek basınçlarla indüklenen sınırlamanın kesme bantlarından kaynaklandığını göstermektedir.

Çeçen (2007), metro gibi yaşam alanlarının altından geçen tünellede yüzeyde meydana gelebilecek ve tünel içerisinde oluşabilecek deformasyonların minimum seviyede tutulmasının önemli bir durum olduğu dile getirilmiştir. Tünel inşaatı çalışmalarında uygun tahkimat sisteminin seçilmesinin öneminden bahsedilmiştir. Çalışmada İstanbul Metrosu'nun Koska bölgesinde inşa edilen tünellerin deformasyon eğrileri oluşturulmuştur. Ayrıca bir tünel inşaatı sırasında kazı çalışmalarının, başka bir tünelin yüzeyinde meydana gelen deformasyon üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Buradan hareketle geoteknik parametreler, zemin sınıfı, bitişik tünel inşaatı ve destek sistemlerinin yüzey deformasyonu üzerinde etkili faktörler olduğu belirlenmiştir. Ek olarak yarı ampirik denklemlerle tahmini deformasyonlar hesaplanmıştır. Bu değerler ile gerçek değerler karşılaştırılarak yüzey deformasyonlarının sorun oluşturacak oldukça büyük değerlere erişmemesi için gerekli önlemlerin alındığı belirtilmiştir.

Osmanoğlu (2007), çalışmada tünellerin doğal zorluklarla karşılaşılan alanlarda ulaşım problemini ortadan kaldırmak için tasarlandığı belirtilmiştir. Tünel türleri anlatılmış, tünel açma çalışmalarından önceki safhalardan, yeryüzü ve yeraltında

gerçekleştirilen işlemlerden ve iksa metotlarından bahsedilmiştir. Tünel inşaatı metotlarından Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Tasarım ve planlama sürecinde sonlu elemanlar metodunu kullanarak güvenilir sonuçlara ulaşmışlardır. Ek olarak Plaxis programı kullanılarak tünel hattı boyunca inşa edilmesi düşünülen yapılardan ötürü oluşabilecek deformasyonların analizi gerçekleştirilmiştir. Ulaşılan sonuçlar ve oluşan deformasyonların istenilen sınırlar içerisinde kalmasını sağlamak için farklı türlerde zemin iyileştirme metotlarına başvurulmuştur.

Ademoğlu (2008), TBM ve NATM tünel açma yöntemlerinin uygulandığı tünel inşaatı çalışmalarında jeodezik işlemler araştırılarak incelenmiştir. Çalışmanın temel amacının ilk olarak tünel inşaat safhası göz önüne alınmakla birlikte tünel tasarımında önemli yere sahip olan jeodezi ve ölçme işlerinin uygulamada eriştiği bilimsel ve teknik kazanımların tünel inşaatı üzerindeki etkilerinin araştırılması olduğunu belirtmişlerdir. Tünel uygulamalarında jeodezik çalışmaları oluşturan yukarıda bahsedilen temel etmenlerin yanı sıra, TBM ve NATM yöntemleri ile gerçekleştirilen tünel inşaatı uygulamalarında gerekli görülen ölçme disiplinleri değerlendirilmiştir.

Şeker (2008), dünyada hızlı bir şekilde meydana gelen teknolojik gelişmeler beraberinde tünelcilik faaliyetlerinde yeni yöntemler keşfetme gereğini ortaya koymuştur. Alışılagelmiş tünel inşa yöntemlerinden farklı olarak NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi) yönteminin yaygın olarak kullanılmaya başlandığı vurgulanmıştır. NATM metodunun en önemli özelliğinin tünelin geometrik şeklinden bağımsız olarak farklı cinsteki zemin şartlarında uygulanabilir olduğunu belirtmiştir. Çalışma kapsamında Bouira Karayolu Tüneli yapımını ele almıştır. Yaptığı incelemeler sonucunda ulaştığı verilerden hareketle sonlu eleman yöntemi prensibiyle analiz yapan Plaxis programını kullanarak tünelin tasarımı gerçekleştirmiş ve iki boyutlu analiz yapmıştır. Tasarlanan model ile zemin yüzeyinde meydan gelen ve tünel kaplamalarında oluşan etkiler üzerinde durulmuş ve tünellerin birbirleri üzerinde meydana getirdikleri etkiler irdelenmiştir. Böylece kademeli kazı kullanılmasına elverişli NATM metodunun uygulanması sonucunda tünelin etrafında ortaya çıkan

deplasman değerlerinde düşme olduğu gözlenmiştir. Gerçekleştirilen analizlerden hareketle tünel inşaatındaki ön boyutlandırmalar gözden geçirilerek güncellenmiştir.

Aksoy vd. (2009), İzmir Metrosu'nun 2. etabının bir parçası olarak tünel ekseninde batmış şaftlardaki stabilite ve Göztepe istasyonunun kesişme noktaları, sonlu elemanlar metodu ile analiz edilmiştir. Daha sonra yerinde yapılan etütler ve ölçümlerin sonuçları ile karşılaştırılarak sonuçlar doğrulanmıştır. Çalışma sırasında, şaft-tünel kavşak alanları boru kemer yöntemiyle geçilmiştir. Bu güçlendirmenin temel nedeninin şaftın ve tünelin boyutlarındaki belirgin farklılıktan (şaft kesit alanı tünelinkinden daha küçük) dolayı olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle, tünel şaftının kavşak alanının dengesi, şaftın tüm yükünün tünel desteği ve zemin tarafından taşınacak şekilde hesaplanmasıyla tasarlanmıştır. Tünelde yerinde yakınsama ölçümleri 8-10 mm değerini vermiştir. Son yıllarda, boru kemer metodunun özellikle zayıf jeolojik koşullardaki kentsel tünellerde büyük önem kazandığı belirtilmiştir. Bağımsız bir destek sistemi olarak görülmemesi gereken boru kemer yönteminin, bilinen destek sistemlerine ek olarak kabul edilmesi gerektiği ve uygulamadan önce ayrıntılı analizlerinin yapılması gerekliliği söylenmektedir. Çalışmada, tünel-şaft kesişimi, boru kemer sistemi kullanılarak kötü jeolojik koşullar altında yoğun nüfusa sahip bir yerde başarıyla uygulanmıştır. Uygulama sırasında ve sonrasında yakındaki yapılarda hasar gözlenmediği çalışmada belirtilmektedir. Boru kemer metodu için uzunluk, çap vb. gibi parametrelerin araştırılmasının önemli olduğu vurgulanmaktadır.

Aktaş (2009), günümüzde giderek artan nüfusun beraberinde yaşam alanlarının kısıtlanması sorununu ortaya çıkardığından yeryüzündeki alanların yanı sıra yeraltının kullanımı gerekliliğini de ifade etmiştir. Bu bağlamda yeraltının kullanımı için tünel gibi yeraltı yapılarına ihtiyaç duyulmuştur. Zemin mekaniği çalışmaları sonucunda alışılagelmiş tünel yapım düşüncesinden farklı olarak ortalama yarım asırdır bir hayli projede yararlanılan NATM' nin (Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu) ortaya çıkması sağlanmıştır. Çalışmada Kağıthane - Piyalepaşa Tünelleri ele alınmıştır. İlk olarak gerçekleştirilen sondaj çalışmalarından hareketle laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar göz önüne alınarak tünel, jeolojik ve geoteknik bakımdan incelenmiştir. NATM metodu esasları göz önüne alınarak sonlu elemanlar metodu ile

çalışan Plaxis 3D Tunnel programı sayesinde tünelin analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları incelenerek tünellerin emniyetli olarak açılmasında mühim olarak görülen parametrelerin etkilerine ulaşılmıştır.

Küçük vd. (2009), kimyasal enjeksiyon uygulamasındaki ilerleyen gelişmelerin, eski Romalılardan başlayarak, yüzyıllar boyunca devam ettiğini belirtmişlerdir. Günümüzde, inşaat ve maden mühendisliğinde, toprak stabilizasyonu, destek ankrajı, tabaka sızdırmazlık, yeraltı su akışı ve su girişinin azaltılması, çeşitlendirilmesi ve tünelde bir yük taşıma halkası oluşturulması dahil çeşitli kimyasal enjeksiyon uygulamalarının mevcut olduğunu ileri sürmüşlerdir. Tünel çalışmaları sırasında zemin suyunun aşırı yükte drenajı, suyun tahliye edilmesi ve aşırı yük içindeki gözeneklerin kapatılmasının zemindeki oturmanın artmasına neden olacağını ileri sürmüşlerdir. Bu çalışmada, yeraltı suyu seviyesi orijinal seviyeden 3 m' ye düşürülmüş ve zemindeki oturma 25 mm' ye ulaşmış, iç tünel dikey yakınsama tünelden 3.5 l / s yeraltı suyu drenajından sonra 6.5 mm olmuştur. Daha sonraki saha ölçümleri ve gözlemleri, tüneldeki yeraltı suyu drenajının 0-0,5 l / s' ye düşürüldüğünü ve yüzey yerleşimlerinin kimyasal enjeksiyondan sonra durduğunu göstermiştir.

Aksoy ve Onargan (2010), zemindeki oturmanın yoğun kentleşmiş bölgelerde kazılan tünellerin en önemli çevresel etkileri olduğunu ileri sürmüşlerdir. Yapılan kazı çalışmaları ve tünel yüzeyinin tünele doğru hareket etmesi sırasında zeminde önemli miktarda oturma meydana geleceğini söylemişlerdir. Zemindeki oturma nedeniyle binalarda zarar oluşma riskinin yüksek derecede olabileceğini vurgulamışlardır. Bu nedenle zemin mühendislerinin, tünelleri kazarken zeminde oluşan oturmaları kontrol ederek binalardaki olası hasarı önlemek için önemli bir görev üstlenmekte olduklarını vurgulamışlardır. Son zamanlarda çeşitli ve önemli alanlarda yüzey cıvata tekniği ile boru kemer uygulamaların gerçekleştirildiğini belirtmişlerdir. Bu yöntemde taban oturmalarının, tünel yüzü hareketinin tünele girmesini sınırlamak, tünel yüzü etrafında boru kemeri uygulaması ile birlikte bir sahte kabuk oluşturmak ve ardından yüzey cıvataları ile stabiliteyi artırmak suretiyle büyük ölçüde azaltılabileceğini vurgulamışlardır. Bu çalışmada İzmir'in yoğun nüfuslu Poligon ilçesinde bulunan İzmir Metro Tüneli inşaatının II. etabının bir bölümü olarak boru kemer- yüz cıvatası

tekniğinin zeminde meydana gelecek oturma miktarına hangi yönde etki ettiği tercih edilen sayısal modelleme metodu ve arazide gerçekleştirilen ölçümlerle ortaya koyulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde boru kemer ve yüz cıvatası tekniğinin zeminde meydana gelecek oturma miktarını % 69, yakınsama değerini ise % 57 azalttığı gözlemlenmiştir. Oranlar dikkate alındığında kullanılan tekniğin (yerleşim alanındaki yapılarda) oturma nedeniyle oluşacak hasarı önemli derecede düşürdüğü görülmektedir.

Atasoy (2010), çalışmasında NATM yöntemini (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi) literatür ve aynı zamanda uygulama çalışmalarını da göz önüne alarak detaylı olarak incelemiştir. Uygulama olarak İstanbul Metrosunun III. bölümünü ele almıştır. Çalışmada ele alınan hat ile ilgili gerekli bilgiler ortaya konulduktan sonra çalışmanın gerçekleştirileceği alanın jeolojisi, alanda bulunan zemin tabakalarının yapısal özellikleri ve laboratuvar deneyleri incelenmiştir. Akabinde çeşitli tünel açma yöntemleri özetlenmiş, ek olarak jeolojik ölçüm metotları ile ilgili deformasyonların belirlenmesi ve tünel destek elemanlarıyla ilişkili olan parametreler ve kullanılan ekipmanın hassasiyeti konularına önem verilmiştir. Özellikle NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi) metodunun ilkeleri, tünel inşaatı, uygulama esnasındaki başlıca esaslar ve destekleme sistemleri detaylı olarak irdelenmiştir. Son olarak kazı hızları, jeoloji, destekleme sistemleri ve maliyet açısından karşılaştırmalar yapılmıştır.

Kun (2010), gün geçtikçe artan nüfusa bağlı olarak kentlerde ortaya çıkan yetersiz alan, planlama sorunları vb. yeryüzünde yeni yaşam alanlarının oluşturulması gereğini ortaya koyduğunu, bu alanlarda yer altının da kullanılmasının zorunlu kılındığını vurgulamıştır. Bu planlama sorunlarının ve nüfusun çeşitli ihtiyaçlarının yer altı konumunda ancak tünel gibi yer altı açıklıklarının oluşturulması ile karşılanabileceğinden bahsetmiştir. Çalışmada tünel uygulamalarındaki riskli durumlardan, şehir içerisinde gerçekleştirilecek tünel çalışmalarında üst yapının pozisyonunun tünel üzerinde oluşturacağı etkilerden, zayıf fiziksel özelliklere sahip zemin şartlarında tünel tasarımı kriterlerinden bahsedilmiş olup, sayısal modelleme tekniğinin yanında analitik, ampirik ve gözlemsel modelleme yöntemleri de kullanılarak oluşacak etkiler de araştırılmıştır. Gerçekleştirilen araştırmalardan

hareketle fay zonlarında ve zayıf zemin tabakalarında tünel açma işlemlerinde hangi parametrelerin etkin olduğu ve kullanılan modelleme yöntemlerinden hangisinin daha etkili sonuç verdiği çalışmada bahsi geçen güzergah göz önüne alınarak incelenmiştir.

Polat (2010), NATM metodu ile tünel açma çalışmaları esnasında tünel kazısının neden olduğu yüzey oturmalarını, zemin ile tünel arasındaki ilişkiyi, tünel cidarında oluşan gerilmeleri ve tünel deformasyonlarını incelemiştir. Buradan hareketle çalışmada tünel tasarımı ve modellemesi gerçekleştirilmiştir.

Cingöz (2013), günümüz dünyasında giderek artan nüfus ile birlikte ortaya çıkan ulaşım problemleri git gide arttığından devlet kurumlarının ulaşım hizmetleri için gerekli bütçe payını arttırmakta olduğunu dile getirmiştir. Ulaşım probleminin yoğun olarak yaşandığı İstanbul şehrinde toplu taşımaya büyük ölçüde önem gösterildiğini ve bu amaçla metro projelerinin öneminin arttığını belirtmiştir. Bir dize yoğun iş kalemlerinin bir arada bulunduğu metro inşaatlarında inşaat işinin süresini, maliyetini büyük ölçüde etkileyen ve kaba inşaat safhasının önemli kısmını oluşturan ana unsurun tünel kazısı olduğunu ileri sürmüştür. Yapılan çalışmada tünel inşaatında inşa yönteminin seçimi ve bu yöntemin proje süresine ne gibi bir etkide bulunacağını değerlendirmek üzere İstanbul ilinde yer alan Kadıköy ve Kartal mevkileri arasındaki metro inşaatı göz önüne alınarak irdelenmiştir. Tünel inşaatında kabul gören TBM (Tünel Açma Makinesi) ve NATM (Yeni Avusturya Metodu) gibi önemli iki yöntem karşılaştırılarak irdelenip bunların zaman üzerindeki etkilerinden hareketle maliyetleri araştırılmıştır. Ortaya konulan verilerden hareketle metro tünellerinin inşaatında hangi durumda hangi yöntemin daha tesirli olduğu belirlenmiştir.

Kun ve Onargan (2013), günümüzde çeşitli amaçlar için daha geniş yer altı alanlarına büyük ihtiyaç duyulmakta olduğunu ve bu nedenle, fay zonları, kırılmış kaya kütlesi ve yeraltı suyu gibi belli başlı zorluklara rağmen, yeni metro tünellerinin inşasının kentsel yaşamdaki talebi karşılama zorunluluğu haline geldiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada, zayıf kayalarda sığ bir metro tüneli etrafındaki riskli bölgeleri araştırmayı ve tünel davranışının yapılarda zemin yüzeyindeki etkilerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Bu nedenle, tünel hattındaki riskli bölgelerin saha gözlemleri, laboratuvar çalışmaları ve bilgisayar modellemesi ile belirlenmesi

girişiminde bulunmuşlardır. Daha sonra bilgisayar modellerinden elde edilen verilerle yerinde ölçümlerden elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Modelleme ve yerinde ölçümlerden elde edilen sonuçlar üst yapının mevcut durumu ve zemindeki kazı öncesi ve sonrası durumlar arasındaki farklar dikkate alınarak yorumlanmıştır. Son olarak, modelleme analizinden ve ölçümlerden elde edilen veriler ışığında, binaların yüzey güvenliği için hali hazırda kullanılan destek sisteminin güçlendirilmesi gerekliliğini vurgulamışlardır. Kaya bulonlarının uygulama aralıklarının kısaltılması, koruma yayı uygulaması ile yüzey çivileri kullanılması ve jet grout yöntemlerinin kullanımı gibi önlemlerin alınabileceğini belirtmişlerdir.

Öztürk ve Dündar (2013), çalışmada metro tünellerinin çeşitli inşaat yöntemlerini ve maliyetlerini, ayrıca işletme maliyetlerini, yolcu kapasitesi ve tünel uzunluğu vb. diğer parametreleri de göz önüne alarak hesaplayıp en elverişli inşaat ve işletme maliyetlerini öne süren bir yaklaşım yöntemi ortaya koymuşlardır.

Öztürk (2013), metro tünellerinin oluşturulması esnasında uygulamanın gerçekleştirildiği alanın koşullarının değiştiğinden ve bu değişime zeminin tepki verdiğinden çalışmasında bahsetmektedir. Zeminin vermiş olduğu bu tepkinin ilk olarak enerjiyi dengelemek, daha sonra türünü değiştirmek ve son olarak da nihai seviyesini azaltmak ile mümkün olacağını ileri sürmüştür. Farklı yaklaşım ve teoremler ortaya konularak tünel stabilitesini tetkik etmiştir. Çalışmada teorilerin bilinen esasları dikkate alınarak tünele gelen düşey itkiler göz önünde bulundurulup değerlendirme ve kıyaslama gerçekleştirilmiştir.

Selman (2014), mevcut yaşam alanlarında tünel yapımının zeminde oluşturacağı etkinin yapıları ve dolayısıyla alt yapı tertibatlarını etkilemeyecek seviyede olması gerektiğini belirmiştir. Tünel için kazı çalışmaları gerçekleştirilirken yüzeyde zemin veya tünel çalışmalarından ötürü oturmalar oluşabileceğini ve oluşan bu oturmalar dikkate alınmadığı taktirde veya çeşitli önlemlerle minimuma indirgenmemesi halinde yapılarda can ve mal kayıplarının görülebileceğine dikkat çekmiştir. Bu sebepledir ki bazı kabuller ve metotlarla, derin kazı veya tünel inşaatı sebebiyle yüzeyde oluşabilecek oturmaların var olan yapılar üzerindeki etkisinin incelenmesinin oldukça

önemli olduğunu vurgulamıştır. Çalışmada ele aldığı tünel inşaatının, farklı yapıların altından ilerlemekte olduğunu, bu sebeple kazı çalışmaları esnasında yapılarda ne tür hasarların oluşabileceğinin tahmin edilmesi gerektiğinin önemini belirtmiştir. Çalışmada belirtilen metro projesinde NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi) metodu kullanımı ile açılan tünelin daha önce var olan üst yapılar üzerindeki etkisini araştırmış ve Burland metodunu kullanarak yapının hasar değerlendirmesini gerçekleştirmiştir.

Algın ve Ekmen (2015), NATM tüneli ve kazıklı temel ile oluşturulan köprü sistemi arasındaki etkileşimi üç boyutlu sonlu elemanlar metodu ile analiz etmiştir. Tünel inşası sırasında, tünelin hemen üzerindeki kazıkların meydana getirdiği oturmaların tasarım sınırları içerisinde kalmayarak bunu aşabildiğini ve böylece kazıkların yanal satıhlarında taşınan yüklerde önemsenecek miktarda düşüşe neden olduğunu sayısal sonuçlar ile göstermişlerdir.

Satıcı ve Topal (2015), daha önceki dönemlerden günümüze kadar farklı tünel açma metotlarının bulunmuş olduğunu fakat bunların çoğunun tam ayna kazıları ve kademeli kazı sistemlerinin türevleri olduğunu belirtmişlerdir. Çağımızda ADECO-RS ve NATM olarak adlandırılan iki metodun yaygın olarak kullanıldığını ileri sürmüşlerdir. Bahsedilen bu iki metotla kaya kütlesinin tutumunun farklı biçimlerde sınıflandırıldığını fakat değerlendirmeye yönelik başlıca objektif bir bilginin ortaya konulamadığı sonucuna ulaşmışlardır. Çalışmada tünel inşaatında yaygın olarak tercih edilen tünel açma metotlarının, sayısal modeller ve uluslararası standartlarda uygun görülmüş kaya kütlesi sınıfları ile arasındaki ilişki ve ek olarak uygulama esnasında karşılaşılan sorunlardan bahsetmişlerdir. Buradan hareketle modelleme esnasındaki yanlışlar ve doğru modelin tasarımı için uygulanması gereken aşamalar birer örnek doğrultusunda açıklanmıştır.

Algın vd. (2017), tünel inşaatında esas kazı desteği elemanı olarak jet grout kolonlarının (JGC) oluşturulduğu Aescher (Zürih, İsviçre) Tünelinin analizini üç boyutlu sonlu elemanlar metodu (3B SE) ile gerçekleştirmiştir. Kanopi biçiminde jet grout zemin iyileştirme yönteminin uygulandığı alanın yüzeye yakın bölgesinden

örnek alınmış ve literatürde ilk olarak gerçeğe yakın bir şekilde 3B SE modellemesi detaylı olarak oluşturulup analizi gerçekleştirilmiştir. Buradan hareketle literatürde var olan sonuçlar ile kıyaslamalar yapılarak gerçekleştirilen analizin geçerliliği ortaya koyulmuştur. Jet grout kolonlarının (JGC) oluşturulmasında kolon uzunluğuna bağlı olarak kolon çapında meydana gelen değişim eğik sinüs fonksiyonu göz önüne alınarak modellenmiştir. Geliştirilmiş bu modelin analiz sonuçlarından yola çıkarak yapım esnasında yüzey oturma değerlerinin ne açıdan değişiklik gösterdiği incelenmiştir. Böylece jet grout kolonları (JGC) kullanılarak desteklenmiş kazı çalışmalarında gerekli görülen tünel inşaatı safhaları için öneriler ileri sürülmüştür.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu tez çalışması kapsamında, İzmir Göztepe Metro İstasyonu bölgesindeki fay zonundan geçen ve Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi kullanılarak açılan tünelin radye temel performansına etkisi araştırıldığından çalışmanın ana materyalini İzmir Göztepe İstasyonu Tüneli (radye temel ve NATM tünel inşaatı modeli) oluşturmuştur. Bu safhada çalışmanın en önemli noktalarından biri olan NATM tünel inşaatı metodunun tanımı, inşaat aşamaları, uygulama sırasında ihtiyaç duyulan ekipmanlar hakkında bilgiler verilmiştir. NATM tünel inşaatı yöntemi ile radye temeller arasındaki etkileşim ve tasarım kriterleri tez çalışmasının 'Araştırma Bulguları ve Tartışma' bölümünde ele alınmıştır.

3.1.1. Tünel Açma Yöntemleri ve Temel Parametreleri

3.1.1.1. Tünelciliğin Tarihsel Anlamda Gelişimi

İnsanlar tarih öncesi dönemlerde barınma ihtiyaçlarını karşılamak üzere mağaraları kullanmışlar ve zamanla barınmak için gerekli alan arttığından bu mağaraları genişletmek için yeraltında ilkel yöntemlerle (su ve sirke kullanılarak elde edilen karışım) kazı çalışmaları yapmışlardır. Ülkemizde Kapadokya mıntıkasında yer alan Derinkuyu yer altı şehirleri bu konuda örnek teşkil etmesiyle görenleri hayrete düşürecek bir galeri ağını gözler önüne sermektedir. Barınma ihtiyacını karşılayan insanoğlu bu defa savaş taktiği olarak düşmanın etrafını çevirmek veya kaçmak amacıyla yeraltında kazı çalışmaları yürütmüşlerdir. 1863 yılında Londra' da ilk kez ulaşım problemini ortadan kaldırmak adına Metropolitan Railway ismi ile yeraltı demiryolu kullanılmaya başlanmıştır. 1868 yılında gelişen dünyanın ilk yeraltı demiryolu metrosu olan Newyork Metrosu ulaşım sistemi hizmete başlamıştır.

İlk tünel inşaatı çalışmalarının kanal inşaatı ile başladığı düşünülmektedir. Tahminlere göre bilinen ilk tünel 157 metre uzunluğunda 1679-1681 yılları arasında Fransa' da inşa edilen Malpas Tüneli' dir. Amerika' da Auburn' da Schuykill Kanalı' nın üstündeki ortalama 6,5 x 5,49 metre kesitli ve 250 m uzunluğundaki tünel ise elverişsiz zemin şartları dolayısıyla kısa süre içerisinde deformasyona uğramıştır. Tünel inşaatı çalışmaları sonucu oluşturulan yapılar son 150 yıllık zaman zarfı içerisinde gelişme göstermiştir. Demiryolu çalışmalarında kat edilen önemli ilerlemeler gelişmenin en mühim sebeplerindendir. İlk olarak Avrupa' da sonraki dönemlerde Amerika' da meydana gelen demiryolu devrimi tünelcilik faaliyetlerini önemli derecede hızlandırmıştır. Zaman içerisinde demir yollarına istenilen düzeyde eğim verilememesi, maliyetlerin ve gerçekleştirilen çalışmaların devasa boyutta olması, engebeli alanlarda demiryolu geçişinin olanaksızlığı, tünel inşaatı çalışmalarını gerekli kılmıştır. 1830 yılından sonra kaya mekaniği prensiplerine uygun tünel çalışmaları başlamıştır. Fransa ile İtalya' yı birbirine bağlayan 12,7 kilometre uzunluğundaki Mort Cenis Tüneli 13 yıl süren çalışma sonucunda 1871 yılında işletmeye açılabilmiştir (Köse ve diğer., 2007).

1950'li yıllara kadar yaşanan ekonomik sorunlar ve savaş nedeni ile karşılaşılan zorluklar tünelcilik faaliyetleri dahil tüm alanlarda durgunluğa neden olmuştur. 1950'li yıllarla birlikte tünel açma yöntemlerinin zaman içerisinde gelişmesi şehir içi ve şehirlerarası ulaşım ihtiyacında meydana gelen artış, canlıların içme ve sulama suyuna duydukları ihtiyacın artması gibi sorunlara çözüm oluşturarak tünel inşaatı faaliyetlerini tekrardan canlandırmıştır. İtalya, Japonya ve birçoğu Almanya' da bulunmak üzere 1970 ve 1980'li yıllarda kilometrelerce tüneller açılmıştır (Duffaut, 1996a).

Tünelcilik çalışmaları son 50 yıllık süreç içerisinde Amerika ve Avrupa ülkelerindeki hızlı gelişime bağlı olarak ülkemizde de hızla gelişmeye devam etmiştir. Ülkemizde genel anlamda sulama alanları, karayolu ulaşımı ve metro alanlarında tünelcilik faaliyetlerinden yararlanılmaktadır. Dünya ve ülkemiz göz önüne alındığında iki tane 26,4 km' lik sistemden oluşan Urfa Tünelleri en uzun sulama tünelleridir. Bununla birlikte son zamanlarda İzmir-Aydın otobanı üstünde yapımı

tamamlanan Selatinler Tüneli karayolu tünelleri açısından etkili bir yapıt olarak karşımıza çıkarken, İzmir ve İstanbul Metro Tünelleri' nin tamamlanan güzergahları ulaşım kolaylığı sağlaması adına güzel örneklerdendir.

Çizelge 3.1. Geçmiş dönemlerden günümüze kadar gelen bazı tüneller ve özellikleri (Köse ve diğer., 2007'den düzenlenerek)

Tünel Adı	Yapım Yılı	Yeri	Amacı	Çapı (m)	Uzunluk (m)
-	MÖ 15000	Avrupa	Maden	-	-
-	MÖ 4000	Anadolu	Nakliyat	3,50x5,40	1000
	MÖ 2000	İtalya	Nakliyat	7,50	900
Aksırat	MÖ 300	Anadolu	Suyolu	0,80x2,0	45000
-	MÖ 200	Anadolu	Nakliyat	3,80x4,80	960
-	MÖ 36	İtalya	Ulaşım	7,60-9,15	1220
Facinus	MS 41	İtalya	Drenaj	-	5635
Mal-passe	1679-1681	Fransa	Su Yolu	7,0x8,0	160
Thames	1807-1842	İngiltere	Ulaşım	-	-
Schuylkill	1818-1820	Amerika	Suyolu	5,50x6,10	250
Moodhead	1839-1841	İngiltere	Demiryolu	8,50x6,70	4843
Bergen	1850-1855	Amerika	Demiryolu	8,50x6,40	1281
Mont cenıs	1857-1871	Fransa-İtalya	Demiryolu	7,60x6,10	12700
St. Godhard	1872-1881	İsviçre	Demiryolu	8,0x7,50	14980
Sımplon I	1895-1906	İsviçre	Demiryolu	5,0x5,35	19730
Sımplon II	1912-1921	İtalya	Demiryolu	-	-
Rove	1911-1922	Fransa	Deniz Tün.	-	7118
Connaught	1913-1916	Kanada	Demiryolu	8,50x7,90	8052
Tanna	1918-1934	Japonya	Karayolu	-	-
Appenin	1920-1931	İtalya	Demiryolu	9,40x8,30	18510
New cascade	1924-1927	Amerika	Demiryolu	8,0x7,50	14980
Metro	1900-	Paris	Ulaşım	7,80	15200
Metro	1937-1946	Londra	Ulaşım	14,10	4620
Metro	1934-1964	Moskova	Ulaşım	2,0x6,0	59500
Metro	-	Chicago	Ulaşım	4,50	22500
Mest delaware	1955-1959	Amerika	Sulama	4,10	70858
E. Turnut	1954-1958	Avustralya	Sulama	7,30	22224
Harold roberst	1957-1960	Amerika	Sulama	3,95	37485
Mont blanc	1959-1965	Fransa İtalya	Demiryolu	9,0x12,45	12650
Kadıncık I	1967-1969	Türkiye	Hidroelektrik	4,00	7128
Urfa	1977-1992	Türkiye	Sulama	9,00	2x26400
Eyüp	1986-1987	Türkiye	Kanalizasyon	2,20	1865
Selatinler	1988-1994	Türkiye	Karayolu	12,5	2x2950
Yahazu	1990-1993	Japonya	Karayolu	12x7,5	2x2000
İstanbul	1992-	Türkiye	Ulaşım	6,40	2x6500

İzmir	1995-2001	Türkiye	Ulaşım	2x6,5	2x1400
İzmir	2000-2007	Türkiye	Karayolu	12	1800
İzmir	2001-	Türkiye	Ulaşım	12	5400

Günümüz dikkate alındığında tünellerin oluşturulması, teknik adımlarla kayaçların tabii dengesini bozmadan kayayı oymak ve sağlamlaştırmakla sağlanır. Şehirler arasında bağlantı sağlamak amacıyla tüneller ile istenilen uzunlukta güzergah ağları oluşturulabilir. Günümüz dünyasında tüneller, otoyollarda %8, su ve atıkların deplase edilmesinde %77, metro ve demiryolu inşaatında %15 oranında kullanılmaktadır.

Tünellerin hangi maksatla kullanılacağı göz önüne alınarak çap ve uzunlukları belirlenir. Su tünelleri dar çaplıdır ve genellikle 24-40 km civarı uzunluğa sahiptirler. Karayolu ve demiryolu tünellerinin uzunlukları genellikle 3 km' yi aşmaz ancak araçların serbest hareket etmeleri ve rahat manevra yapabilmeleri amacıyla çap büyük tutulur. Dünyada kayaç içerisinde inşa edilen en fazla uzunluğa sahip tünel Helsinki şehrinin su ihtiyacını gidermek için inşa edilen 120 km uzunluğundaki Paijanne Tüneli' dir.

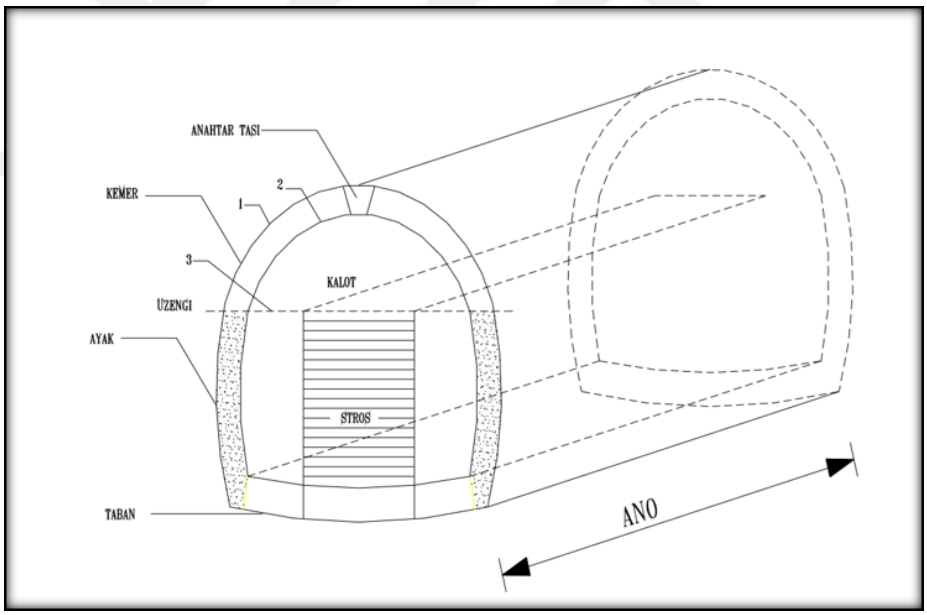
Bir önceki paragrafta bahsedilen tarihsel süreç içerisinde tünel inşaatının gerekli olduğunu ortaya koyan nedenler aşağıdaki gibi başlıklar halinde belirtilebilir.

- Nüfus yoğunluğunun fazla olduğu büyük şehirlerde ulaşım hizmetinin daha kolay ve hızlı bir şekilde sağlanması gerektiğinde,
- İçme suyu veya atık suyun aktarılması ya da yönünün değiştirilmesi istendiğinde,
- Karayolu ve demiryolu güzergahının herhangi bir sebeple kesişmesinin istenmediği hallerde,
- Kullanılan güzergahın belirli bir bölümünde tünel inşaatı ile önemli derecede kısalma sağlanıyorsa ve tünel inşaatı sırasında ihtiyaç duyulan mali yatırım bu güzergah kısalması ile sağlanacak ekonomi ile karşılanabiliyorsa,
- Dağlık bölgelerde aşılamayan tepelerin aşılması zorunluluğu gibi durumlarda,

tünellerin inşa edilmesi kaçınılmaz bir ihtiyaçtır. Hangi amaçla kullanılırsa kullanılsın günümüzde tünelcilik çalışmaları, gelişen teknoloji ile birlikte farklı metot ve ekipmanların kullanımıyla git gide gelişen bir uzmanlık alanı olarak karşımıza çıkmaktadır.

3.1.1.2. Tünel Tahkimat Elemanları

Tüneller; yeryüzünden aktarılmasının teknik açıdan elverişsiz olduğu veya ekonomik açıdan uygun görülmediği bölgelerde karayolu, demir yolu, kanal vb. iletim sistemlerinin yeraltından nakledilmesi için uygun görülen, boyuna oranla çapları çok az olan, eksenin eğimi 30 dereceden az olan iki ucu açık yeraltı yapılarıdır. Tünel inşaatı yapılırken var olan kaya yapısının kazılabilmesi ve desteklenebilmesi başlıca önemli iki unsurdur (Köse ve diğer., 2007).



Şekil 3.1. Tünel enkesitinin gösterimi (Erguvanlı, 1984)

Tünel enkesitinin yukarıda gösterildiği şekilde (Şekil 3.1.); tünelin yol aldığı boşluğun üst tarafı ‘tavan’ veya ‘kemer’, yan tarafları ‘yan’, ‘duvar’ veya ‘ayak’, alt tarafı da ‘taban’ veya ‘radye’ olarak adlandırılır. Tünelin kemer bölümünün ayak kısmıyla birleştiği yer ‘üzengi’ veya ‘üzengi seviyesi’, üzengi seviyesinin üst bölgesinde kalan yer ‘kalot’, üzengi seviyesinin alt tarafında bulunan bölüm de ‘orta

kısım' veya 'stros' olarak adlandırılır. Tünel kazısı sırasından tünel içerisinden çıkarılan yığın 'pasa' olarak adlandırılır. Herhangi bir yöntemin uygulanması esnasında, işlemin gerçekleştirildiği parça 'ano' olarak adlandırılır. Ano uzunluğu uygulanan yönteme göre farklılık göstermekle birlikte 1.5 m ile 9 m arasında bir uzunluğa sahip olabilir.

Günümüzde kullanım amaçları dikkate alınarak tünellerin sınıflandırılması aşağıdaki gibi yapılabilir (Köse ve diğer., 2007).

- Ulaşım amacıyla açılan tüneller
- Su tünelleri
- Yeraltındaki boşluklara nüfuz etmek amacıyla açılan tüneller
- Askeri amaçlı açılan tüneller
- Sığınak olarak kullanmak üzere açılan tüneller
- Nakil hatları (gaz nakilleri vb.) için açılan tüneller
- Maden yataklarına erişmek için açılan tüneller

Sığ tünelcilik durumlarının söz konusu olduğu, faylı ve zayıf zonların aşılması gerektiği ve tünel kazısının klasik metotlarla yapıldığı hallerde, gerek kazı çalışmaları sırasında gerekse destekleme çalışmaları sırasında tünel içerisinde ek olarak bazı tedbirlerin alınması gerekebilir. Son zamanlarda tünelcilik anlamında bilimsel çalışmaların yoğunlaşması ve ortaya konulan sonuçlardan hareketle tünel inşaatında klasik destek elemanlarına (püskürtme beton, hasır çelik, çelik iksa vb.) ek olarak boru kemer, kaya bulonları, ayna çivileri ve sürenler tercih edilmektedir. Belirtmiş olduğumuz bu ek destek elemanları tünel için ön görülen risk faktörleri dikkate alındığında yalnız, birlikte veya enjeksiyon teknikleri ile entegre olarak kullanılmaktadır. Buradan hareketle tünel inşaatında kullanılan destekleme elemanlarının işlevlerine aşağıda özetle değinilmektedir.

Püskürtme Beton

Püskürtme beton; kuru veya ıslak olarak kazı yüzeyine pompa yardımıyla püskürtülerek yapıştırılabilen ve farklı alanlarda kullanıma açık olan (Şekil 3.2. ve Şekil 3.3.) bir destek elemanıdır. Püskürtme beton uygulaması kayalar arasındaki boşlukları doldurarak sökülme ve dağılmalara engel olan, tünel kesiti etrafındaki kayanın kazı alanı içerisine doğru hareket etmesini (gevşemesini) önleyen ve tünelin kazı yüzeyine yakın kısımlarındaki zemin/kayanın kesme dayanımını arttıran bir uygulamadır. NATM metoduna göre bir defada fırlatılan püskürtme beton dolgunluğu 20 cm' yi aşmamalıdır. Püskürtme beton uygulaması, tünel kazısının akabinde meydana gelebilecek deplasman ve gerilmelerin bir bölümünü önler.

Püskürtme betonun kazı yüzeyine tatbik edilmesinde yaş ve kuru olmak üzere iki metodunda avantaj ve dezavantajları göz önüne alınmaktadır. Kuru olarak kazı yüzeyine tatbik edilen püskürtme beton, su miktarının yoğun olduğu ortamda bekletilmemelidir ve uygulama esnasında ıslak kum tercih edilmemelidir. Yaş olarak kazı yüzeyine uygulanan püskürtme beton ise bir üniteden özdeşleşmiş bir karışım olarak elde edildiğinden, elverişsiz şartlarda ve uygulandığı kazı yüzeyi üzerindeki etkisi bakımından daha elverişli sonuçlar ortaya koymaktadır.

Kuru metot ile kazı yüzeyine püskürtme beton uygulaması; uygun maliyetli, küçük ölçekli, küçük kapasiteli bir uygulama iken yaş metot ile kazı yüzeyine püskürtme beton uygulaması; yüksek verimli, daha büyük ölçekli ve iletim mesafesi kısıtlı olan bir uygulama metodudur. Çizelge 3.2' de çeşitli araştırmacılar tarafından ileri sürülen zayıf ortam koşulları için püskürtme beton parametreleri aşağıda verilmektedir.



Şekil 3.2. Püskürtme betonun tünelin üstyarı kazısına uygulanması (Atasoy, 2010)



Şekil 3.3. Püskürtme betonun tünelin altyarı kazısına uygulanması (Atasoy, 2010)

Çizelge 3.2. Tünel yapımında farklı araştırmacılar tarafından zayıf kaya tabakalarının tespit edildiği hallerde tavsiye edilen püskürtme beton kalınlığı (Torunoğlu, 2008 düzenlenerek)

Kaya Kalitesi (RQD ARALIĞI)	DEER, 1969 (4-6 m Çaplı Tünellerde Geçici Tahkimat)			HEUER, 1974 4,5-6 m Çaplı Tünellerde Geçici Tahkimat)		CONNEL, 1977
	Kazı Yöntemi	P. Beton Kalınlığı	İlave Tahkimat	Arazi Koşulları	Püskürtme Beton Kalınlığı	Püskürtme Beton Kalınlığı
	Makine ile kazı	Tavanda 10-15 cm Duvarda 1-15 cm		ZAYIF ARAZİ KOŞULLARI	Tavan bölgesinde 7-10 cm,	Yan duvarlarda tabana en az 7-8 cm yukarı doğru artan.
Zayıf 25-20			Kaya bulonu l= 1,2-1,8 m	Tavanda ve duvarda dökülme var. P. betın kaya üzerine iyi yapışmıyor.	Duvarlarda tabana kadar 7-8 cm	Tavanda 15 cm, yan duvarların üst kısmı ve tavanda çelik hasır
	Delme Patlatma	Tavanda > 15 cm Duvarda > 15 cm				
-	-	-		-	-	-
	Makine ile kazı	Tavanda 15 cm Duvarda 15 cm		ÇOK ZAYIF ARAZİ KOŞULLARI		
			Orta Ağırlıkta			
Zayıf < 25 Sıkışan Şişen formasyon hariç	Delme Patlatma	Tavanda > 15 cm Duvarda > 15 cm		Eğer arazi gevşeme davranışı gösteriyorsa	Tavan bölgesinde 10-12 cm, duvarlarda taban kadar > 10 cm.	Taşıyıcı olarak çelik iksa + püskürtme beton, çelik iksalar beton kaplamalı
-	-	-	-			-
Çok zayıf Sıkışan Şişen formasyonlarda	Her iki yöntem	Tavanda > 15 cm Duvarda > 15 cm	Ağır tip profil çelik bağ	Arazide şişme yada aşırı gerilmelerde yenilme davranışı gösteriyorsa		

Hasır Çelik

Zemin ve kaya destekleme sistemlerinde muvaffakiyet gösteren hasır çelikler aynı zamanda perde olarak da adlandırılmaktadır. Uygulama da iki çeşit hasır çelik kaya bulonları ile beraber tercih edilmektedir. Bu çelik hasırlar; birbirine kaynatılarak bağlanılan çelik hasırlar ve birbirine zincir biçiminde geçmeli tellerden yapılarak oluşturulan çelik hasırlardır. Hasırlar eklemlerin sık olduğu ortamlarda ve bulon aralıklarının çok olduğu kaya bölgelerinde bulonlar arasında yer alan blokların desteklenmesi ve püskürtme betonun dayanımını yükseltmek amacı ile kullanılır (Şekil 3.4.).

Hasır çelikler püskürtme beton ile beraber kullanıldığında (ana nakliye galerileri, yeraltı bakım-onarım istasyonları, tüneller, band yolları, vs.) nem ve hava tesirlerine karşı koruma sağlar, sağlamlık kazandırır.

Çelik İksa

Çelik iksa, püskürtme betonun yük dağılımına katkı sağlamak ve yapım güvenliğini oluşturmak amacıyla kazı çalışmasının gerçekleştirildiği tünel alanında püskürtme betonun mukavemetini sağlayıncaya kadar geçen zaman zarfında yardımda bulunmak amacıyla uygulanır (Şekil 3.4.). Kaya ortamı dikkate alındığında uygulanacak olan çelik iksa türleri kafes kiriş, E, H, I ve TH olarak tercih edilebilir. Bu tip destekleme elemanlarından kazı çalışmalarının ardından çokça çatlakların meydana geldiği kaya ortamlarında ve az eklemli kaya bölgelerinde yararlanılabilir.



Şekil 3.4. Tünel inşaatında hasır çelik ve iksa uygulaması (Selman, 2014)

Aşırı çatlak bulunan kaya bölgelerinde küçük boyutlu kaya bloklarının düşmesine engel olmak amacıyla kazı duvarı ve çelik iksa arasındaki bölgeye çelik çubuk, çelik plaka, ağaç takoz veya çelik hasırlar yerleştirilebilir. Çelik ekipmanları kazıyı kuşatan kaya yığınını güçlendirmezler. Fakat deformasyon sonrasında güçsüzleşen çevre kayasına destek sağlarlar. Çelik ekipmanlarının etkileri duvar ile iksa arasına konumlandırılan takozların kalitesiyle ilişkilidir. Çünkü çelik ekipmanlar ön yüklemeye maruz bırakılmadıkları için kazı duvarında aktif basınç oluşturamazlar.

Kaya Bulonları

Kaya bulonları tünel kesiti etrafındaki kaya bloğunun desteklenmesi amacıyla kullanılan esas destek elemanlarından birisidir. Kaya bloklarının konumlarını korumaları amacıyla tekil olarak tercih edilebildiği gibi çevredeki kaya bloklarının mukavemetinin arttırılması için sistematik şekilde de kullanılabilir (Şekil 3.5.).



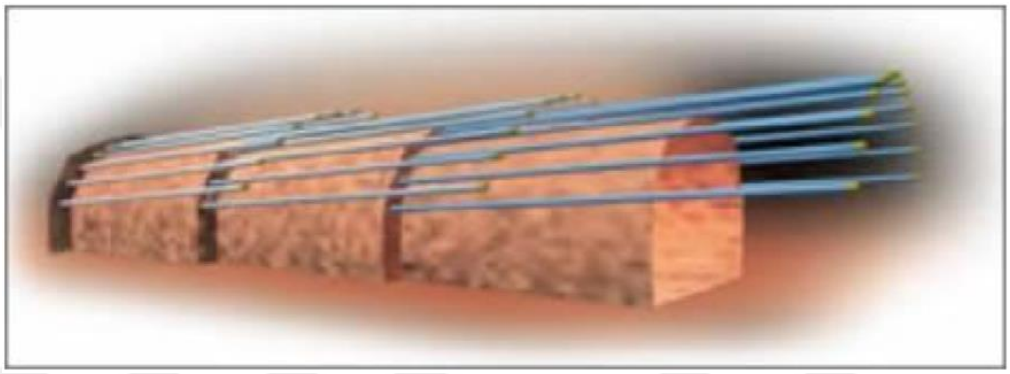
Şekil 3.5. Tünel inşaatında kaya bulonu uygulaması (Selman, 2014)

Kaya bulonları, kayada üç eksenli gerilme halini meydana getirmek, çekme gerilmelerini ana kayaya aktarmak, kayayı çekme gerilmelerini karşılayabilecek biçimde sağlamlaştırmak, süreksizlik oluşan bölgelerde sürtünme direncini yükseltmek amacıyla kaya bloğu içine bağlanan demir çubuklardır. Kaya bulonları tünel kazısı esnasında tavanda veya duvarda kopmak üzere olan, ayrışmış kayaların konumlarını korumalarına yardımcı olan, güvenliği arttıran destek elemanlarıdır.

Son dönemlerde tercih edilen bulon türleri kendinden delen (IBO) bulon, swellex bulon ve enjeksiyonlu bulonlardır. Enjeksiyonlu bulonlar çatlaklı veya kırıklı yapıdaki ortam şartlarında tercih edilirler. Enjeksiyon süresi sona ermeden torklanamadıklarından ötürü çabucak etkinlik gösteren bir bulon türü değillerdir. Enjeksiyonlu bulonların aksine swellex bulonları çabucak çalışan bir yapıya sahiptir. Genel olarak çatlaklı yapıdaki ortam şartlarında tercih edilirler ve kaya yüzeyine tutunma (aderans) prensibine göre etki gösterirler. Bünyesinde yer alan flanşların yardımıyla delik içerisinde şişme ilkesine göre etkinlik gösteren swellex bulonları siltli, killi veya plastik özellik taşıyan alanlarda kullanılmaz. Kendinden delen bulonlar (IBO), dış çeperi yivli olarak 36 mm çapında üretilen delici makine üstünde tij gibi davranan, delgi işlemi sonrasında delik içerisinde bırakılıp dışarıya çıkarılmayan ve üzerindeki deliklerden enjeksiyon uygulanarak kullanılan bulon türüdür. Kritik bina çevresinin desteklenmesinde ve bilhassa şehir içerisindeki tünel inşaatı çalışmalarında kullanılır.

Sürenler

Tünel kazısı sırasında veya tünel kazısı sonrasında kopma, çökme veya dökülmelere eğilim gösteren kazı alanlarında, özellikle faylı ve zayıf zonlarda, yeraltı suyunun tehlike oluşturduğu hallerde, ön koruma ve emniyet önlemi olarak, aşırı miktarda sökülmeye engel olunması, tünel kesitinde göz önüne alınan boyuna istikamette desteksiz kazı mesafesinin azaltılması amacıyla çelik boru veya demir çubuk olarak (Şekil 3.6.) enjeksiyonlu veya enjeksiyonsuz şekilde kullanılan elemanlardır.



Şekil 3.6. Tünel kazısı esnasında süren uygulaması (Selman, 2014)

Özellikle zayıf ortam şartlarında (zayıf kayalarda) ve kohezyonsuz zeminlerde, kazı sırasında veya kazıdan hemen sonra, kazı çalışması yapılan alanın göçmemesi, iksa şerbeti ve püskürtme betonun priz alma sürelerini tamamlamaları açısından emniyetli bir alan ve zaman sağlayan destekleme elemanları olan sürenler genel olarak tünel giriş ve dönüş bölgelerinde 6 metre, metro inşaatında ise 4 metre uzunluğunda kullanılmaktadır.

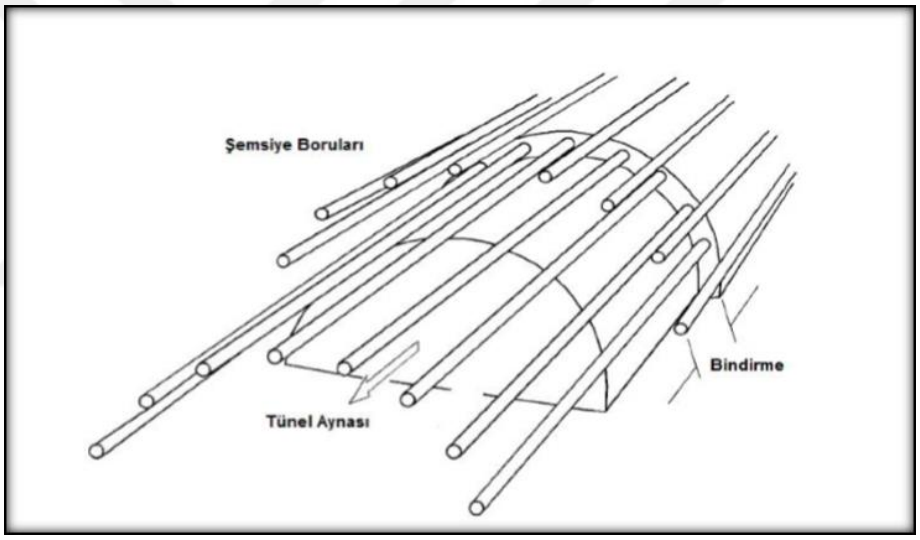
Boru Kemer (Umbrella Arch)

Teknolojinin hızla ilerlemesi ve bilimdeki gelişmeler ile zaman içerisinde tünelcilik çalışmalarında kazanılan deneyimlerden hareketle, zemin iyileştirme yöntemleri ve kaplama konularında, konvansiyonel tünelcilik metotlarında önem arz

eden gelişmeler ortaya çıkmaktadır. Bilhassa zayıf ortam şartlarında ön kemerli yöntemler başlığı altında, farklı metotlar geliştirilmiştir.

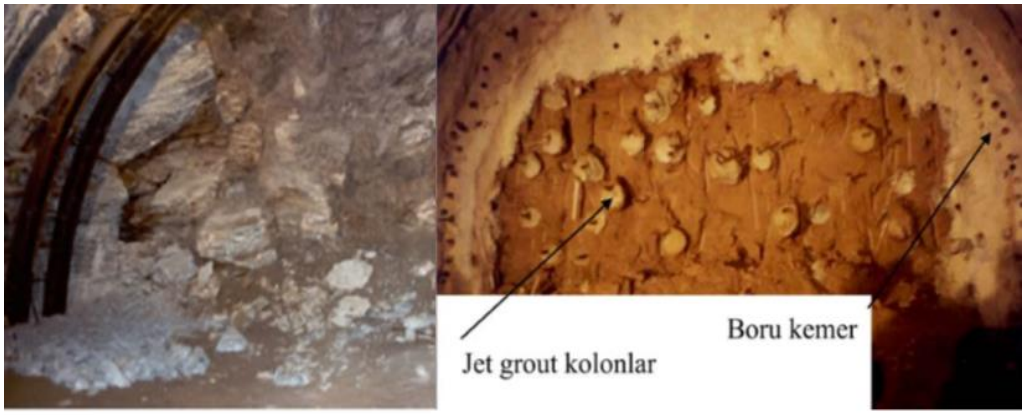
Bu yöntemin ana tasarım prensibi, henüz tünel aynasında kazıya başlanılmadan ileriye doğru, tünelin kazı aynası çevresinde tahkimat kabuğu meydana getirip, ardından bu güvenilir kabuğun altında tünel kazı çalışmalarının yürütülmesi esasına dayanmaktadır (Şekil 3.7.). Tahkimat kabuğu oluşumu, betonlaşmış ön kemer, jet grout kolonları (JGC) veya şemsiye boruları ile sağlanabilir (Leca ve Clough, 1992).

Tünel aynasının stabilitesinin sağlanması amacıyla uygulanan boru kemer yöntemi Şekil 3.8.' de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Tünel aynasının ilerlemesine göre boru kemer yönteminin şematik olarak görünümü (Kun, 2010)

Boru kemer uygulaması, ön kemerlenmeli yöntemler ve zemin çivisi uygulaması ile beraber ilk kez İtalya' da San Vitale Tüneli' nde uygulanmıştır. Tünel, bünyesinde kum, kil, kireç taşı, silt ve marn bulunan zemin şartlarında ortalama 150 metre derinlikte açılmıştır (Leca ve Clough, 1992).



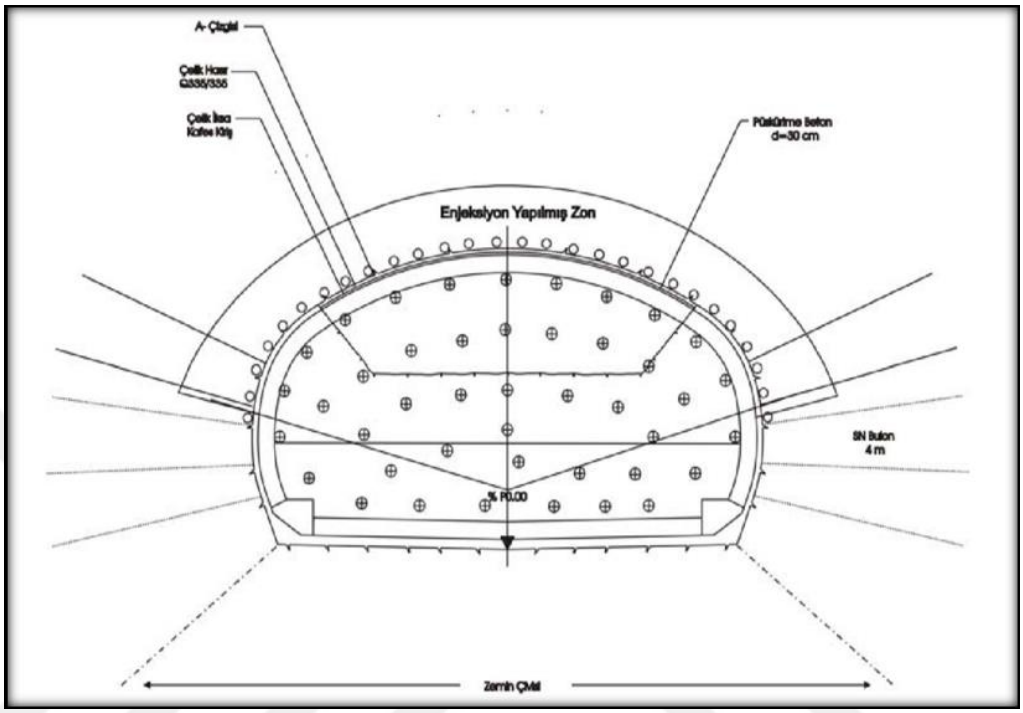
Şekil 3.8. (a) Boru kemer yönteminin uygulanması, (b) Tünel aynasının jet grout kolonları ve boru kemer yöntemi ile stabilitesinin sağlanması (Kun, 2010)

Ayna ve Zemin Çivileri

Genel olarak boru kemer (umbrella arch) yöntemi ile kullanım alanı bulan zemin çivileri, kazı çalışmaları öncesi yüzeyde meydana gelebilecek oturmaları kontrol eder. Sığ tünellerde, zayıf ve killi tabakalarda tünel henüz yüzeyde yer alan ölçüm istasyonuna ulaşmadan önce yüzey oturmalarının hemen hemen yarısı oluşmaktadır. Yüzeyde oluşacak olan oturmalar, gelen yüklerin etkisiyle dayanımını kaybeden ve plastikleşen malzemenin hacmi kadar olacaktır. Bu durumların önlenmesi amacıyla tünel aynası çevresinde yer alan zeminin içsel parametrelerinin pozitif yönde yükseltilmesi gerekli görülmektedir (Onargan vd, 2006).

Tünel aynasının stabilitesinin korunması ve uygulanacak olan ilave yöntemlere destek olması açısından zayıf ve yumuşak ortamlarda açılan tünellerde zemin çivileri olarak adlandırılan destekleme elemanları geliştirilmiştir. Zemin çivilerinin uygulamasında, tünelin kazı aynasına daha önce saptanan uzunlukta ve çapta delinen deliklere belirlenen donatı yerleştirilir ve donatı yerleştirildikten sonra delikler enjeksiyon yapılarak doldurulur. Uygulamada donatı olarak yüksek dayanıma sahip fiberglaslar veya nervürlü çelikler kullanılmaktadır. Uygulama olarak zemin çivisi 1980’ li yıllarda ilk kez İtalya’ da geniş kesitli tünel inşaatlarında kullanılmıştır (Denek, 2003).

Zemin çivilerinin boyutu, sayısı ve yeri uygulama sırasında tünel aynasının stabilitesine göre değiştirilebilir. Zemin çivisi ve boru kemer modeli İzmir Metro Tünelinin II. etap kazısında belirli bir alan için aşağıda gösterilmektedir (Şekil 3.9.).



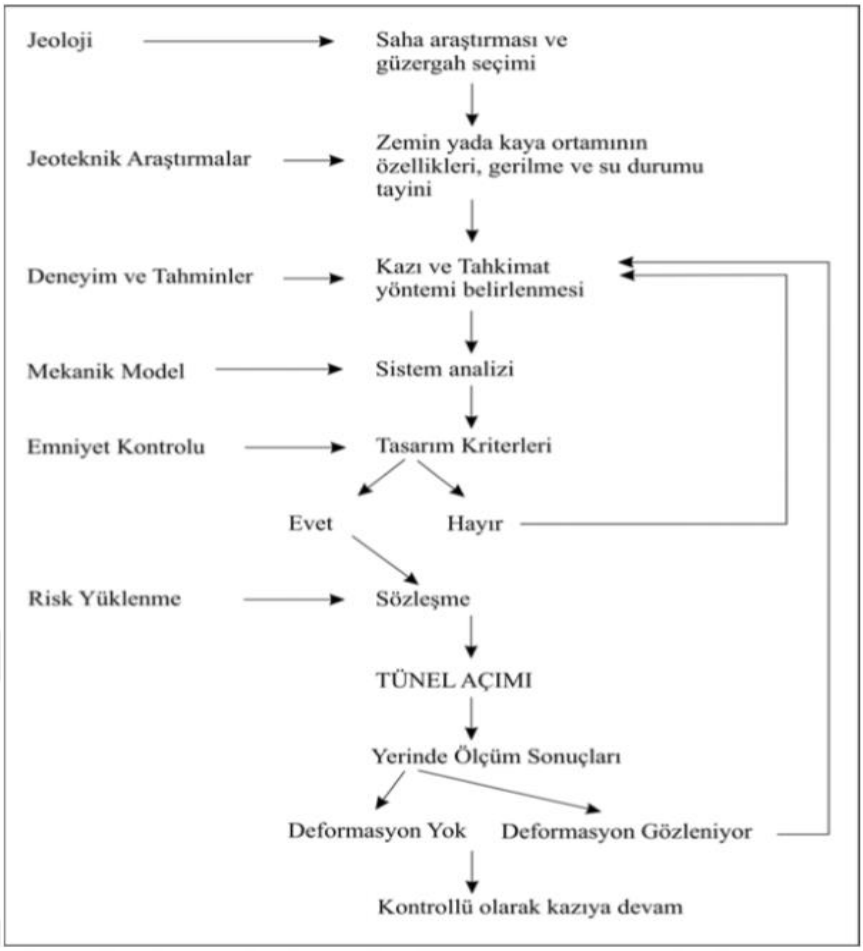
Şekil 3.9. İzmir Metro Tüneli için önerilen ön sağlamlaştırma ve boru kemer yönteminin ölçeksiz en kesit görünümü (Kun, 2010)

Yukarıda zayıf ortam şartlarında tünel açma çalışmalarında destekleme elemanlarından kısaca bahsedilmektedir. Bu destekleme elemanları sayesinde zayıf ortam şartlarının iyileştirilmesi, kaya kalitesinin yükseltilmesi, güvenli kazı sürecinin elde edilmesi amacıyla kazı alanına jet grout ve enjeksiyon gibi iyileştirme yöntemleri de kazının gerçekleştirileceği ortam şartlarına bağlı olarak bireysel veya birlikte uygulanabilmektedir.

3.1.1.3. Tünel Açma Yöntemleri

Tünel açma çalışmalarının başlangıç anından bitimine kadar gerçekleştirilen işlem aşamaları aşağıda olduğu gibi özetlenebilir (Bell, 1994).

- Tünel çalışmalarının gerçekleştirileceği bölgenin jeolojik yapısı tespit edilerek, tünelin güzergahı, yeri ve derinliği belirlenmelidir.
- Tespit edilen güzergah üzerindeki zeminin veya kaya tabakasının yeraltı su seviyesi, yapısından kaynaklı bozukluklar (fay, kırık, eklem takımı vb.) ve dayanım parametreleri belirlenmelidir.
- Buradan hareketle kazanılan deneyimler ve yapılan hesaplamalardan yola çıkarak ulaşılan veriler ışığında, kazının metodu, kullanılacak olan tünel tahkimat elemanları, tünel kazısının kesiti, tünel kazısının gerçekleştirileceği makinenin türü ve ihtiyaç halinde drenaj yöntemleri tespit edilmelidir.
- Yapısal bir model tasarlanmalı ve elimizde var olan farklı veriler, farklı türdeki tahkimat elemanları ve farklı zemin şartları kullanılarak oluşturulan modele uygulanmalıdır.
- Gerilme deformasyonlardan yola çıkarak hazırlanan modelin güvenirliliği gözden geçirilmelidir.
- Tünel açımı ile birlikte yerinde ve sürekli ölçümler paralel olarak yapılmalı ve ulaşılan deformasyon değerleri incelendiğinde ilerlemeye ve zamana göre değişiklik göstermiyorsa yapıma devam edilmelidir. Şekil 3.10.' da tünel açma çalışmaları esnasında takip edilecek aşamalar kısaca özetlenmektedir.



Şekil 3.10. Tünel açma çalışmaları esnasında izlenecek yol (Bell, 1994 düzenlenerek)

Tünel açma ve destekleme çalışmaları kapsamında kullanılan yöntemlerin ortaya çıkma sebepleri, gelişim süreçleri ve yöntemler arasındaki ilişkilere bu bölümde örneklerle değinilecektir.

Tünel açma çalışmaları sırasında tercih edilen inşaat yöntemleri her zaman doğal şartlara uygun olmalıdır. Bu sebeple, tünel inşaatı metodu ve tahkimat yöntemi, salt teoriye takılı kalmamalı ve kaya tabakasının değişkenliğine duyarlı olmalıdır. Tünel inşaatı ve tahkimatı konusundaki fikirler 20. yüzyılda 3 ana teknik ile ortaya konulmuştur;

- 1920' li yıllarda taş ve ahşap gibi malzemeler kullanılan pasif tahkimat tercih edilmiş, sonraki zamanlarda ortaya çıkan yerinde dökme beton ve ağır çelik

tahkimat ile daha büyük tünel boşlukları oluşturma imkanı doğmuş ve tünel açma çalışmalarında yüksek hızla ilerleme kat edilmiştir.

- 1960' lı yıllarda özellikle maden ve inşaat mühendisliği alanlarında kaya saplamaları ve püskürtme beton kullanımı Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi' nin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu metotla daha sonraki zamanlarda hem sığ hem de derin tünellerde önemli gelişmeler elde edilmiştir.
- 1990' lı yıllar ve 2000' li yılların başında ise henüz yeni geliştirilmiş olan ön tahkimat sistemleri kullanılmaya başlanmış ve bu durum ise zayıf zemin koşullarında Yeni İtalyan Yöntemi' nin kullanılmasına olanak tanımıştır (Duffaut, 1996a).

Tünelcilik faaliyetlerinin başladığı ilk zamanlardan bu yana yeraltı boşluklarının ve yeraltı açıklıklarının kendilerini desteklemesi, ek olarak hiçbir destek elemanına ihtiyaç duyulmadan gerçekleştirilmiştir. Kemerlenme olarak adlandırılan bu ana ilke, tarih öncesi dönemlerde insanlara, aşırı süreksizlik barındırmaması şartı ile düşük dayanıma sahip kayaçlar içindeki duraylı boşluklarda yaşama imkanı sağlamıştır.

Geçmiş zamanlarda kilise ve köprüler için kendini destekleme ilkesine çatı kemerleri inşaatında ihtiyaç duyulmuştur. Bu kemer türleri, kendisini meydana getiren bloklar, yerine tam olarak yerleştiği taktirde çimentoya ihtiyaç duymadan konumunu koruyabilmişlerdir. Kemerler yapısını meydana getiren elemanların ilerleme sıkışma etkisi sayesinde yerçekimi kuvvetlerini karşılarlar. Yeraltında oluşan yükler ve bu tür üç boyutlu kemerlenmeler doğa aracılığıyla karşılanmaktadır. İnşası gerçekleştirilen kemerler baz alındığında doğru olarak kabul edilen tüm durumlar, yeraltı boşlukları, insanların kendi eliyle açtığı veya doğal olarak teşekkül etmiş tüneller için de geçerlidir (Duffaut, 1996b).

Eğer kayacın yapısı tünel etrafında oluşacak teğetsel gerilmeleri karşılayacak dayanıma sahip durumda ise ve kötü olarak yönlendirilmiş eklem yüzeylerine sahip değilse boşluk, ek olarak bir tahkimata ihtiyaç duymaksızın ayakta duracaktır. Genişliği 50 metre civarında doğal olan bu büyük boşluklar günümüzde bir hayli

yaygındır. Kendi kendine ayakta kalabilen 400 metre genişliğindeki Malezya' daki Good Luck yeraltı boşluğu şuana kadar bilinen boyut olarak en büyük boşluktur.

Kaya tabakasının olabildiğince homojen olması halinde ve boşluğun çevresi boyunca kaya dayanımı aşıldığı taktirde boşluğun çevresinde fazla gerilmeyi içeren plastik halka tabakası meydana gelmektedir. Plastik deformasyon nedeniyle kaya tabakasına aktarılacak yüksek seviyedeki hasar, ince bir tabaka halinde püskürtme beton uygulamasıyla yani düşük kalınlığa sahip bir tahkimatla önlenebilir.

Kaya tabakası çatlaklı bir yapıya sahipse ve hatta zemin malzemesi halinde ise artık kendi kendini taşıyamayacak hale gelir. Bu nedenle kaya tabakasını kuvvetlendirmek ve bütün olarak bir arada tutmak için kaya saplamalarına veya çimentolamaya ihtiyaç duyulur (Duffaut, 1996b).

Pasif Tahkimat

Tünel inşaatı çalışmalarının ilk dönemlerinde, tünel kesitinin tamamı küçük kesitlere ayrılarak, açılan boşluklar ahşap elemanlarla desteklenerek ve açılan boşluğun ardından diğer boşluk açılarak gerçekleştirilmekteydi. O dönemlerde tünel inşaatı çalışmalarının İtalyan, Fransız, Avusturya, İngiliz, Alman ve Belçika tünelcilik yöntemleriyle anılması şaşırtıcı değildi.

Bahse konu olan bu yöntemlerde tünelin kendisini desteklediği alan, iyi zemin koşullarıyla veya ahşap tahkimatlar arasındaki küçük boşluklarla sınırlanmıştı. Tünel inşaatında kullanılan ahşap üniteler geçici olup, tuğla veya taş kemerler gibi uzun zaman aralığında dayanım gösterebilecek elemanlarla yer değiştirmesi uygun görülüyordu. Kemer gibi yapıların esas olarak dezavantajı, düz yüzeyli olduklarından pürüzlü yapıdaki kayaç yüzeyine tam anlamıyla yerleşemiyorlardı ve inşaatı haftalarca sürebiliyordu. Bu tarz gecikme durumları kaya tabakasının gevşemesine ve aşınmasına neden oluyor ve kemer üzerine git gide artan yükler etki etmeye başlıyordu. İkinci Dünya Savaşı sonrasında tünel inşaatı çalışmalarıyla ilgili iki yeni fikir ortaya koyuldu. Bu fikirleri aşağıdaki gibi ortaya koymak mümkündür:

- Ahşap tahkimatın yerini geçici tahkimat olarak çelik tahkimatlar aldı ve böylece çalışmalar esnasında açılan daha büyük boyuta sahip boşlukların desteklenmesi sağlandı. 1949 yılında Terzaghi' nin standart haline getirilen bu metodu daha sonra Amerikan Çelik Tahkimat Metodu (AÇTM) olarak adlandırıldı (Terzaghi ve Peck, 1948).
- Nihai kaplama olarak yerinde dökülen beton taşın yerini aldı ve böylece kemer ile kaya tabakası arasında homojen bir birliktelik sağlandı.

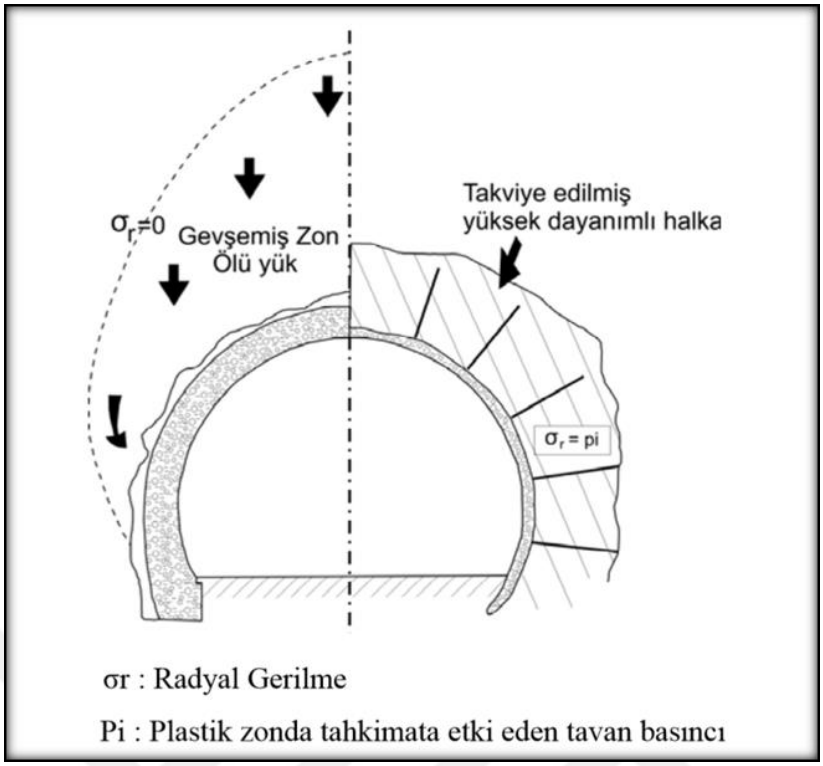
Yukarıda aktarılan tünel çalışmalarında uygulanacak olan bu iki yenilik, tünelcilik faaliyetlerinde endüstrileşmeyi sağlayıp insan gücünden daha az yararlanarak daha hızlı yol almanın olanaklı olduğunu göstermektedir.

Eski Zamanlardan Bugüne Uygulanan Tünel Açma Yöntemleri

Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) Uygulaması ve Geliştirilmesi

İsviçre' li mühendisler tarafından 1960' lı yıllarda ortaya çıkarılan, yukarıda anlatılan prensipler, Von Rabcewicz isimli Avusturyalı mühendis tarafından pratik hale getirilmiş ve uygulanabilirliği muhtemel olan yeni iki yöntem geliştirilmiştir. Amerika' dan püskürtme beton uygulamasını, kömür madencilerinden ise kaya saplamalarını örnek alarak yöntemin amacı net bir şekilde belirlenmiştir. Bu hedef doğrultusunda temel amaç, birçok ağır eleman kullanarak kaya basıncını tahkim etmek yerine (Şekil 3.11.) kaya tabakasının kendi kendini desteklemesine katkıda bulunmaktır (Karakuş ve Fowel, 2004).

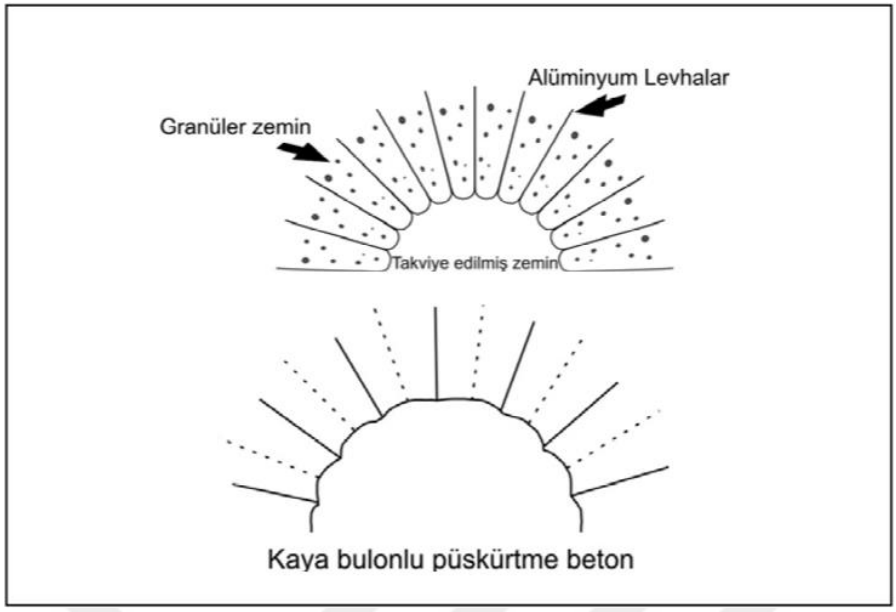
Avusturyalı mühendisler ayrıca tünelin şeklinin, kazı yönteminin ve tünel kesitinin ortamdaki zeminde meydana getireceği olumsuz etkilerden kaçınılması gerekliliğinin önemini de kavramışlardır. Ayrıca baraj mühendislerinin yapmış olduğu gibi zaman kavramını gözeterek zeminin göstereceği reaksiyonlarında ölçülmesinin lüzumlu olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 3.11. Kesitin solundaki pasif ve kalın olan tahkimat ile kesitin sağında NATM ile takviye edilmiş bölümün karşılaştırılması (Duffaut, 1996a)

Kaya tabakası, püskürtme beton ve kaya saplamaları ile elde edilen yapı, örnek olarak taneli zemin kütlesi, paneller ve metal çubuklarla desteklenmiş zemin ile (Şekil 3.12.) kıyaslanabilir. Söz konusu iki durum için de esas mekanik görev takviye edilmiş zemin kütlesi veya takviye edilmiş kaya kütlesine yüklenmektedir. Burada püskürtme beton uygulaması yalnızca yüzey kaplaması olarak kullanılmakta olup, uygulamanın yapılmasının temel sebebi muhafaza edilemeyen ortamdaki taze kaya kütlesini muhafaza etmektir.

Anlatılanlardan yola çıkarak NATM metodu 20. yüzyılın ikinci yarısında etkili olan bir tünel açma yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu metodun esasında, zeminin zayıf tarafını çeşitli pahalı ve yapay ekipmanlar ile ortadan kaldırmak yerine zeminin mevcut konumundaki özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır (Rabcewicz, 1964).



Şekil 3.12. Takviye edilmiş yukarıda yer alan zemin kemeri ile kaya saplaması ve püskürtme betondan oluşan aşağıdaki tünel tahkimatı arasındaki benzerlik (Duffaut, 1996a)

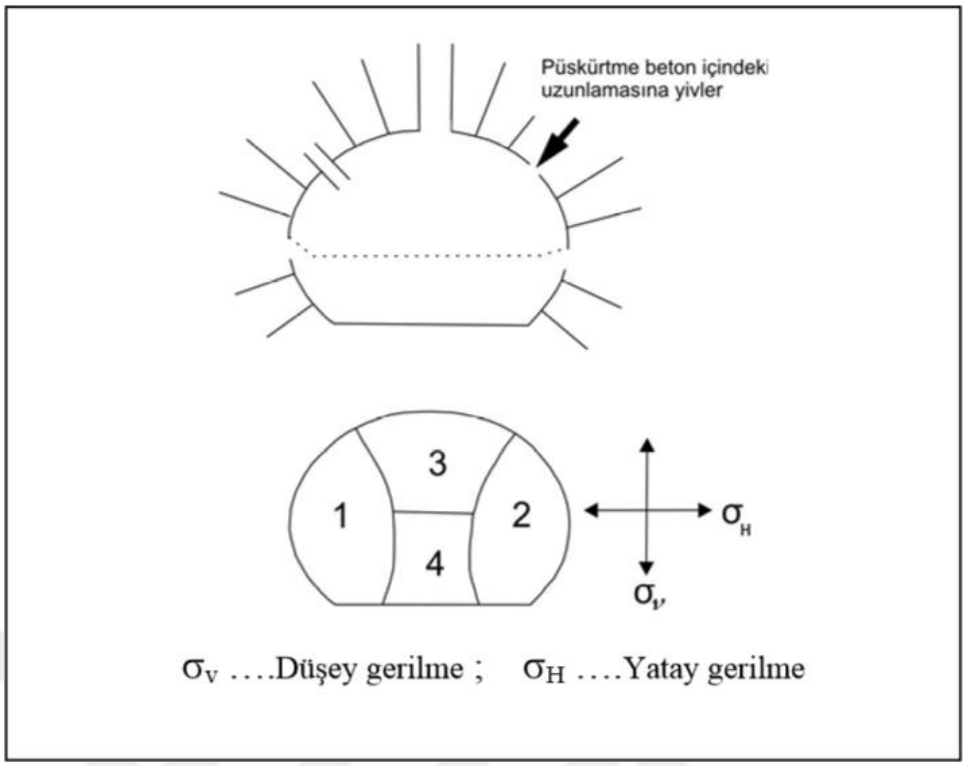
Bu yöntem göz önüne alındığında şüphe duyulabilecek tek nokta, uygulamanın hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekliliği, iş organizasyonunun itinalı olarak sağlanması ile eş zamanlı ve gerçek izleme işlemlerinin gerçekleştirilmesidir.

Çoğu Japonya, Almanya ve İtalya' da olmak üzere 1970'li ve 1980'li yıllarda NATM metodu ile kilometrelerce uzunluğa sahip tünel açma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca tünel açma çalışmaları esnasında başarısız sonuçlarla da karşılaşılmıştır. Bu başarısız tünel inşaatı çalışmalarına 1994 yılında inşa edilen Münih Tüneli ve İngiltere' deki Heathrow Hava Alanı bilinen iki örnek olarak verilebilir. Münih Tüneli göz önüne alınırsa, alüvyonlu çakıl taşının umulmadık biçimde derinleşmesinden dolayı tünelin taç kısmında göçük meydana gelmiştir. İngiltere' deki Heathrow Hava Alanı göz önüne alınırsa, tasarımı gerçekleştirilirken karamsar düşünce yapısı ile üç tane birbirine paralel tünel açmak istemişlerdir. Ancak kireç taşı içerisinde kanal tünel yapımında etkili olan bu yöntem hava alanında var olan Londra kilinde başarısız sonuç vermiştir.

1970 ve 1980' li yıllarda birçok ülkede 'güçlendirilmiş kayaç halkası' tünel inşaatı çalışmalarında vazgeçilemez bir kavram olmuştur. Halen günümüzde de örtü tabakasının kalınlığına göre uygulamalar değişiklik göstermektedir.

Derin tüneller göz önüne alındığında, kayaçta istenmeyen değişikliklerin olmasını engelleyerek, elastik veya elasto-plastik gerilmenin rahatlamasına katkı sağlamak gerekmektedir. Tünelin kapanma olasılığı dikkate alındığında, püskürtme beton kabuğu göçertecek güce sahip ise kayaç kapanıma başladığı anda tünelin uzunlamasına doğru çalışacak yivler tasarlamak gerekmektedir (Şekil 3.13.). Bu şekilde tasarlanan yivler, tam manasıyla kayaç kütlesinden aşağıya sarkan kemerin kaya saplamaları aracılığıyla bağımsız bölümlerinin sınırlarını ortaya koyar. Alp Dağlar' ı içerisinde bu yöntemle en zor koşullarda açılan tünellere Arlberg, Tauern, Inntal ve Karwendel Tünelleri örnek olarak gösterilebilir.

Genel olarak yumuşak kayaçlarda veya zeminlerde açılan sığ tünellerde, yüzey oturmalarını sınırlandırmak ve zeminde oluşabilecek geri çevrilemeyen makaslama kuvvetini önlemek amacıyla her türlü deformasyonun önüne geçilmelidir. Avusturya' lı mühendisler 1980' li yıllarda yan taraflarda sürülen iti tane sivri kemer şekle sahip galerinin, üst kılavuz kazısı ile yer değiştirmesini planlamışlardır. Bu yapı sistemi, zemin yüzeyinde etkili olan düşük yatay gerilmeler açısından oldukça uygun görülmüştür (Şekil 3.13.). Almanya' da yapımı gerçekleştirilen 150 km uzunluğa sahip hızlı tren yolu tünelleri, Almanya' daki birçok şehrin ve Viyana' nın metro tünelleri gerekli durumlarda yeraltı su seviyesinin istenilen düzeye düşürülmesinin ardından bu şekilde inşa edilmiştir. Buradan yola çıkarak, Almanlar Avusturyalılara herhangi bir ihracat primi ödememek amacıyla yöntemi 'püskürtme beton kaplama yöntemi' olarak adlandırmışlardır.



Şekil 3.13. Yukarıda bünyesinde uzunlamasına yivler barındıran derin tünel, aşağıda ise sivri kemer biçimindeki yan galeriler (NATM' nin değişkenleri), (Duffaut, 1996a)

Almanya' nın haricinde Japonya ve İtalya NATM uygulamalarını 1970' li yıllarda kendilerine aktarmışlardır ve 1980' li yıllarda ise Çin bunları takip etmiştir. O yıllardan günümüze kadar bu ülkeler sadece NATM (New Austrian Tunneling Method) ve TBM (Tunnel Boring Machine) tünel açma metotlarını kullanmışlardır.

Fransız Yöntemi

Fransa' da NATM' nin (New Austrian Tunneling Method) ilk kez kullanımı 1970' li yıllarda bilhassa Elektrik İşleri tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu süreç içerisinde Panet' in rehberliğinde Fransız mühendisler tünel tasarımına enterasan bir şekilde katkı sağlayarak 'konverjans-sınırlama' tekniğini geliştirmişlerdir (Panet, 1995). Panet ortaya koymuş olduğu bu teoride tünelin çevresindeki halkanın davranışını açıklamak için matematiksel terimlerden yararlanmıştır. Halkanın git gide kapanmasıyla tahkimat üzerine etki eden gerilmelerin azalmakta olduğunu ileri sürmüştür. Her ne kadar yöntem yalnızca iki boyutlu hesaplamalar yapıyor görünse de, üstü örtülü olarak tünel arınının üstlenmiş olduğu üç boyut üzerindeki rolünün

hesaba dahil edilmekte olduğunu ve hesap yapılırken 'λ' yük boşaltma faktörü kullanıldığını belirtmiştir.

Uygulamada Fransız şirketlerinin birçoğu NATM (New Austrian Tunneling Method) yöntemini önemsememeye devam etmiş ve tünel açma yöntemleri içerisinde önemli bir yere sahip olan bu yöntemin ismini ülke terminolojisinden çıkarmışlardır. Bunu planlarken, zayıf zemin şartlarında daha elverişli sonuçlar ortaya koyan eski bir yöntem olan 'pasif tahkimat' sistemini tercih etmişlerdir. Bu düşünce yapısına tam anlamıyla bağlı kalma, Fransa iştirakçilerinin 1985 yılından sonra tünel inşaatında kalkan kullanımı ve TBM (Tunnel Boring Machine) kullanması ile çelişmektedir.

1970' li yıllarda NATM' nin varlığı ve tanımlanması konusunda bilim dünyasında tartışmalar yaşanmıştır. Bu tünel açma yöntemin uygulama parametreleri konusunda bazı teorisyenlerin kaygılı olduğu gözlenmiştir. Ancak NATM yöntemi uygulamasıyla açılmış bir tünel, ortak ve açık bir biçimde bazı ölçütlerle ortaya konulmaktadır (Duffaut, 1996b). Bu ölçütler;

- Kaya saplamalarının ve püskürtme betonun gecikmeden kullanılması,
- Kaya kütlesinin kendi yapısını desteklemesi konusunda hissedilen güveni sağlaması ve şeklinin yuvarlak olması,
- Tünel kesitinin hızlı bir şekilde kapanması ve deformasyon değerlerinin titiz bir şekilde takip edilmesi,

şeklindedir.

NATM uygulamalarını Fransız mühendisler uluslararası alandaki projelerle başarılı bir şekilde bir araya getirerek bütünleştirmişlerdir. Bu konuda ilgi çekici bir örnek olarak Cenevre yakınlarında bulunan CERN yeraltı boşlukları göz önüne alınabilir. 20 metre uzunlukta açıklığı bünyesinde barındıran CERN yeraltı boşluğunun ayırıcı karakteristiği, ilk kez püskürtme beton örtüsünün duraylılık hesapları yapılırken dikkate alınmamasıdır. Aslında dikkate alınmayan püskürtme

beton örtüsü sayesinde tünelin çevresindeki kaya kütlesi gevşememekte ve orjinal yapısını korumaya devam etmektedir.

Yeni İtalyan Yöntemi

Zayıf veya yumuşak özelliğe sahip zeminlerde, örtü tabakasının oldukça ince olduğu hallerde ya da faylı veya kırıklı zonlarda kazanılan deneyimler, açma işlemi uygulanacak tünelin yalnızca duvarlarının değil aynı zamanda kazı çalışmaları esnasında aynasının da tahkim edilmesi durumunun göz önüne alınması gerektiğini göstermiştir. Bu tahkimat işlemleri aşağıda sıralanan farklı yollarda sağlanabilir;

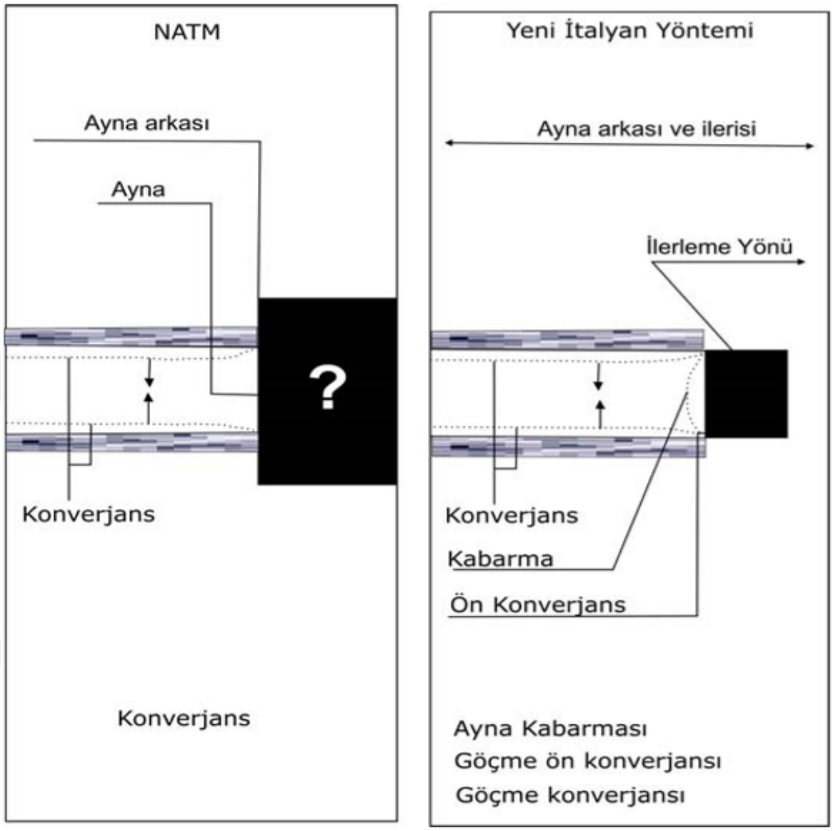
- Tünel aynasına püskürtme beton uygulaması yaparak,
- Arının orta kısmında basamak olması amacıyla kısa bir kütle oluşturarak,
- Tünel aynasını fiberglas saplamalarla destekleyerek,
- Çimento şerbeti enjeksiyonu ve mekanik ön-kesme sayesinde tünel duvarlarının çevresinde dayanıklı kemerler oluşturarak,
- Tünel duvarlarına çelik borular yardımıyla ön sürenler konumlandırarak (şemsiye kemer).

Bahsedilen bu ön tahkimatlı uygulamaların esas amacı tünel arınının çökmesine engel olmaktır.

1991 ile 1993 yılları arasında Fransa' nın Lyon kentinde inşa edilen Galaure TGV tüneli bu yöntem kullanılarak açılmış bir tüneldir. Tünelin kesiti 150 m^2 olmakla birlikte tam kesit şeklinde kazılmış ve tünel aynası 18 metre uzunluğundaki kaya saplamaları ve perforex ön sürenler sayesinde duraylı bir şekilde tutulmuştur.

İtalya bu konu hakkında yeni bir fikir ortaya çıkarmıştır. Ülkede tünel inşaatı çalışmaları, yumuşak veya zayıf zeminlerde gerçekleştirilmekte ve sıkça faylara ve kıvrımlara rastlanıldığı gözlemlenmektedir. Doğal olarak bu durumlar ön tahkimat esaslı yöntemlere yönelmeyi elzem hale getirmiştir. 2000 yılında Lunardi, bu yöntemleri tünel-duraylılık teorisi adı altında bir araya getirmiştir. Teorinin temeli,

'ilerleme çekirdeği' denge koşuluna odaklanmıştır (Şekil 3.14.). Bu teoride esas olarak enlemesinden ziyade eksenel simetri dikkate alınmaktadır ve duraylılık konusundaki etkili değişken ilerleme çekirdeğinde meydana gelen eksenel deformasyondur (dışarıya doğru itilip çıkmasıdır).



Şekil 3.14. Yeni İtalyan Yöntemi ve NATM' de (New Austrian Tunneling Method) kaya kütlesinin deformasyonunun karşılaştırılması (Kun, 2010)

ADECO-RS olarak bilinen bu teori yaklaşık 30 yıl kadar önce tıpkı NATM uygulamasında olduğu gibi tünel inşaatı faaliyetlerine bazı yenilikler kazandırmaktadır. Bu yeniliklerden aşağıdaki şekilde bahsetmek gerekirse;

- Her türlü durum tünel aynası çevresinde meydana gelmektedir. Tünel aynası duraysız ise tünel duvarlarına tahkimat yapılmış dahi olsa çökecektir.

- Diğer etapta ise dairesel formdaki kazı kesitini olabildiğince hızlı bir şekilde kapatmaktır. Bilhassa zayıf zemin koşullarında tünel kesiti alt parçalara bölünmemelidir,

şeklinde özetlenebilir.

NATM yöntemi, kazı çalışması yapılan kesitin çevresinde desteklenmiş bir kaya halkası oluşturmayı tasarlarken, Yeni İtalyan Yöntemi ise ilerideki duvarların çevresinde ve tünel aynasının ilerisinde iyi bir zemin oluşturmayı planlamaktadır.

Bilhassa duraysız ve yumuşak zemin koşullarında uygulanan bu yeni yöntem, NATM (Yeni Avusturya Tünel Metodu) ilkelerinin üç boyutlu uygulaması olarak tasfir edilebilir. Yeni İtalyan Yöntemi' nin duraysız özellikteki düşük ve orta seviyede derinliğe sahip kayaç bölümlerinde açılan tünellerde genel anlamda kabul göreceği aşikardır. Yöntem uygulama esnasında aşağıda aktarıldığı şekilde kullanılmaktadır.

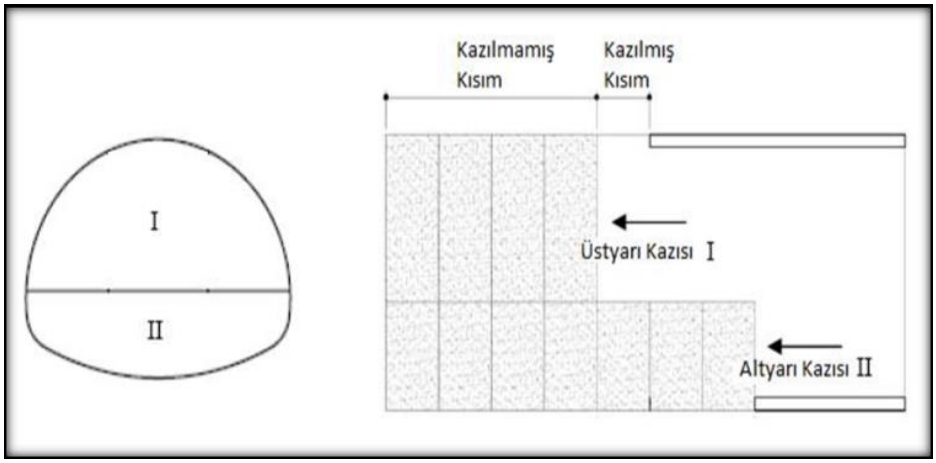
- Tünel, zemin kalitesi gözetilmeksizin tam kesit olacak şekilde açılacaktır. Ön tahkimatlı yöntemlerin şiddeti ve türü düzeltmenin ana parametreleridir. Bu parametreler tünelin ilerlemesine engel olmayacak biçimde rahatlıkla ayarlanabilir.
- Tahkimatın hemen hemen tamamı her 15-20 metrede bir ve yön olarak uzunlamasına yerleştirilir.
- Püskürtme beton uygulaması ile oluşturulmuş kemerlerle birbirine bağlı çelik tahkimattan oluşan duvar tahkimatı, oldukça rijit bir sistem olmakla birlikte, NATM yönteminin sığ tüneller inşa edilirken tercih edilen uygulamasına benzemektedir.
- Son (nihai) tünel kaplaması yalnızca taban ve üst kemer olmak üzere iki etapta dökülmektedir. Bu kaplama, kazıdan sonra çok geçmeden (birkaç gün içerisinde), aynadan, çapının bir kaç mislinden daha kısa mesafede yapılmalıdır. Böylece beton halka hemen hemen tabanda tümüyle kapatılır.

3.1.1.4. NATM Tünel İnşaatı Aşamaları

NATM uygulaması ile açılması planlanan tünelin kazı biçimi; zemin durumuna, tünel için kazı çalışması yapılacak güzergah üzerinde yer alan yerüsütü yapılarına, tünel geometrisine ve uygulanacak iksa sistemine göre farklılık göstermektedir. Dairesel forma sahip olmayan tünel kesitinde, çok parça halinde kazı çalışması gerçekleştirilebileceği gibi tam kesit şeklinde kazı çalışması da yapılabilir. Tünel inşaatında kazı çalışmaları sırasında Şekil 3.15.' te görüldüğü gibi darbeli kırıcı kullanılmaktadır. Genel anlamda NATM uygulanması planlanan bir tünel kesitinde Şekil 3.16.' da görüldüğü gibi üstyarı ve altyarı olacak şekilde iki aşama halinde kazı çalışması yapılır.

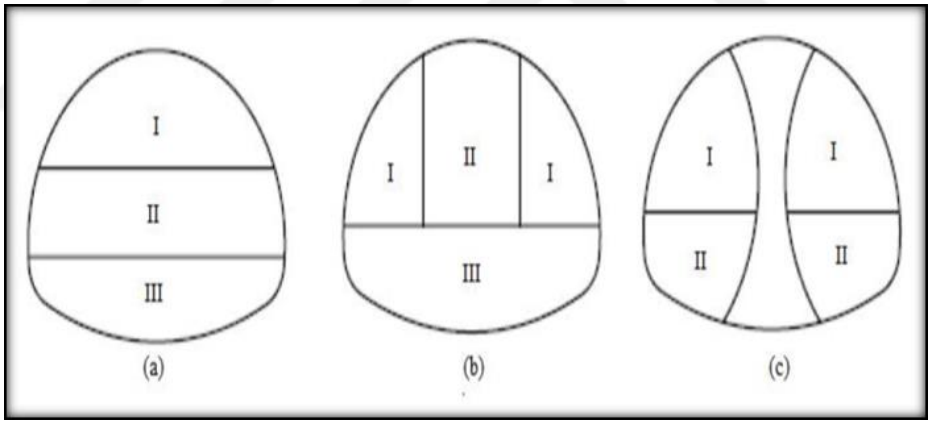


Şekil 3.15. Tünel inşaatında kazı çalışmalarında kullanılan darbeli tünel açma makinesi (Kun, 2010)



Şekil 3.16. NATM uygulamasında aşamalı kazı - 1 (Selman, 2014)

Kazı çalışması yapılırken projede öngörülen mesafe dikkate alınarak üstyarı altyarıdan önce kazılarak devam edilir ve tahkimat sistemi inşa edilir. Dayanıklılığı yüksek kaya tabakasının bulunduğu ortamda hareket edilmesi durumunda tünelin altyarı bölgesine iksa imalatı uygulaması yapılmayabilir.



Şekil 3.17. NATM uygulamasında aşamalı kazı - 2 (Selman, 2014)

Zeminde meydana gelebilecek deformasyonların sınırlandırılması veya zemin profilinin bozulmaması amacıyla üstyarı kazısı Şekil 3.17.' de gösterildiği gibi bölgelere ayrılarak (I, II ve III vb.) yapılabilir (a ve b) veya kazı işlemi çapraz diyagram yöntemi (c) ile de gerçekleştirilebilir. Bilhassa makas tünellerinde olduğu gibi geniş kazı kesitleri göz önüne alındığında tünelin üstyarı kısmının bölümlere ayrılarak (b) kazılması durumu ortaya çıkmaktadır. Yine de bazı tünel projelerindeki çalışmalarda tünelin altyarı kısmının da bölümlere ayrılarak kazılması planlanabilir.

NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi) uygulamasında kazı çalışmaları sırasında yarı mekanize ve delme patlatma olmak üzere iki yöntem kullanılır. NATM tünellerinde uygulama esnasında kullanılması gerekli olan tahkimat elemanları, kullanım amaçları ve işlem aşamalarını çalışmanın bu bölümünde özetlemek mümkündür.

Tahkimat olarak birinci aşamada püskürtme beton uygulanır. Püskürtme beton uygulaması eklem çatlaklarını örterek dağılma ve dökülmeleri önler, böylece kaya tabakasının kendi kendini taşımasına olanak sağlar. Genel olarak püskürtme beton uygulamasının kalınlığının 5 cm olması yeterli görülmektedir. Hatta bu uygulama, kayacın hava ile temas halinde olması önlendiği için duraylılığı da arttırır.

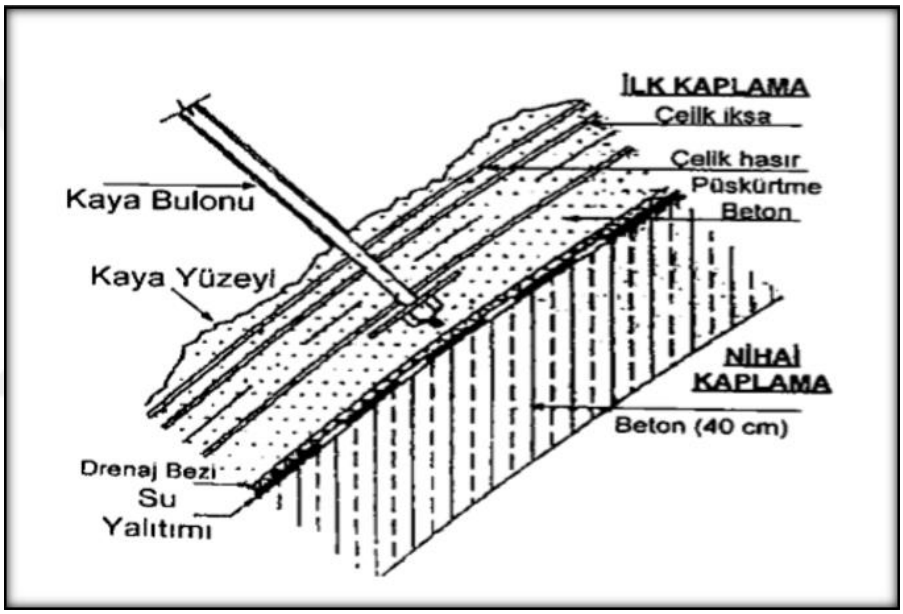
Kafes veya çelik iksa ikinci aşamada tahkimat olarak kullanılmaktadır. Tavanda bulunan kaya tabakasının bir bütün olarak deformasyona uğramasına olanak sağlamak ve kemerlenmeyi başarılı bir şekilde oluşturmak amacıyla kullanılır. Bu uygulamaya bazı kayaç türlerinde ihtiyaç duyulmayabilir. İnşaat çalışmaları sırasında kullanılan donatıların kaynak işlemi ile birleştirilmesiyle oluşturulan kafes şeklindeki iksalar ve haddelenmiş I profiller olmak üzere iki tür iksa uygulamada kullanılır. Donatının kaynakla birleştirilmesiyle oluşturulan kafes iksalar ekonomik olması ve hafifliği göz önüne alındığında uygulamada haddelenmiş I profile göre daha avantajlıdır.

Donatılı püskürtme beton uygulaması tahkimat olarak üçüncü aşamada kullanılmaktadır. Genel olarak 8-25 cm kalınlığında uygulanmaktadır. İlk olarak zemin ile aralarında boşluk kalmayacak şekilde iki iksa arasına hasır donatı yerleştirilir. Daha sonra iki iksa arasına konumlandırılacak olan işban demirlerinin (bağlantı elemanı) montajı yapılır ve daha sonra püskürtme beton uygulanır. Bu uygulama çelik donatının korozyana uğramasına engel olduğu gibi tünel tahkimatının bir bütün olarak çalışmasına da olanak sağlar. Aynı zamanda su yalıtım elemanları ve iç kaplama betonu için elverişli bir yüzey elde edilmesine olanak sağlar.

Son olarak dördüncü aşamada kaya bulonu uygulanır. Kullanım amacı, kazı çalışması sonrasında ikinci durumlardan ötürü meydana gelen plastik deformasyon

alanını, elastik deformasyon alanı içerisinde tutarak doğal yapısı kötüleşen kayaç tabakasını sağlamlaştırmaktır. İhtiyaca göre kullanıma cevap veren farklı türlerde kaya bulonları bulunmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde anlatılan dört tahkimat elemanı ile geçici destek kurulur (Şeker, 2008).

NATM uygulamasının tahkimat elemanları Şekil 3.18.' de ayrıntılı bir şekilde gösterilmektedir. Şekil 3.18. Polat' ın (2010) yapmış olduğu çalışmadan elde edilmiş olup bu kesitin Şeker' in (2008) yapmış olduğu çalışmadan refere edildiği belirtilmiştir.



Şekil 3.18. NATM uygulamasının tahkimat elemanlarının kesit görünümü (Polat, 2010)

3.1.1.5. NATM Kazısı Yapılırken Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

Bilhassa zayıf özelliğe sahip zeminlerde patlayıcı kullanılarak açılan tünelin çevresinde tırtıklı bir yüzey biçimi meydana gelir. Püskürtme beton ilk olarak zayıf yüzey hattı boyunca kopmaların oluştuğu çukur ve köşe alanlara tatbik edilir. Çünkü bu alanlarda meydana gelebilecek gerilme yoğunlaşmalarını önlemek oldukça elzemdir. Püskürtme betonun kazı çalışmasının hemen ardından uygulanması uygun görülmektedir. Püskürtme beton uygulanırken içerisine konulan donatı sayesinde hem

kesme kuvvetine hem de bu kuvvetten dolayı meydana gelecek momentlere dayanım sağlanmaktadır.

NATM uygulamasında birincil gerilme halleri başkalaşmış olan kayaçları arka taraftaki sağlam zemin tabakasına bağlayarak, kayaç tabakasına taşıyıcılık özelliği sağlamak ve meydana gelebilecek deformasyonları belli bir seviyede tutmak amacıyla kaya bulonları kullanılır. Bu sebeple, kaya bulonlarının montajının doğru bir şekilde yapılması önem arz etmektedir. Aksi taktirde istenmeyen durumlar ortaya çıkabilir. NATM' de farklı ikincil gerilme durumların oluşması önlemek amacıyla kazı çalışması, zemini küçük parçalara ayırarak gerçekleştirilir. Bu yöntemde tünel kazısı genel olarak üç aşamada yapılır. İlk aşamada gerçekleştirilen kazı çalışması 'kalot' olarak adlandırılır. Tünel kesitinin yarım daire biçiminde üstyarısının alınmasıyla yapılır. İkinci aşamada gerçekleştirilen kazı çalışmasına 'stros' olarak adlandırılır. Bu kazı çalışmasına, kalot kazısı yaklaşık olarak 25-30 m ilerledikten sonra başlanılır. Bu aşamanın ardından ilk iki aşamayı izleyen son aşama olarak taban (üçüncü kademe) kazısı veya radye kazısı gerçekleştirilir. Tünel inşaatı sırasında kazı çalışmalarının aşama sayısı; makine türüne, kayaç tabakasının cinsine, patlama limitine, tünelin boyutlarına, deformasyon limitine vb. göre değişiklik göstermektedir (Şeker 2008).

Genel olarak üç aşamalı kazı tercih edilen kazı yöntemidir (Şekil 3.19). Ancak kazı aşamasının sayısı kayaç tabakasının özelliklerine ve tünelin boyutlarına göre farklılık gösterebilir. Kazı yöntemi ve bu konuda dikkat edilmesi gereken durumlar ÖNORM B 2203/1994 baz alınarak kayaç özelliklerine ve kazının uygulandığı kesit alanına bağlı olarak kollu galeri açma makineleri, hidrolik kırıcılar veya delme patlatma ile tünel kazısı yapılabilir (Karaoğlan, 2002) (Aktaş, 2009). Tünel inşaatı yapılırken süren delikleri ve ankraj delikleri gibi işlemler gerçekleştirilirken Şekil 3.20' de gösterildiği gibi özel makinelere ihtiyaç duyulur.



Şekil 3.19. NATM uygulaması ile tünel inşaatında üç aşamalı kazı (Lunardi, 2008)



Şekil 3.20. Özel süren ve ankraj delgi makinesi (Lunardi, 2008)

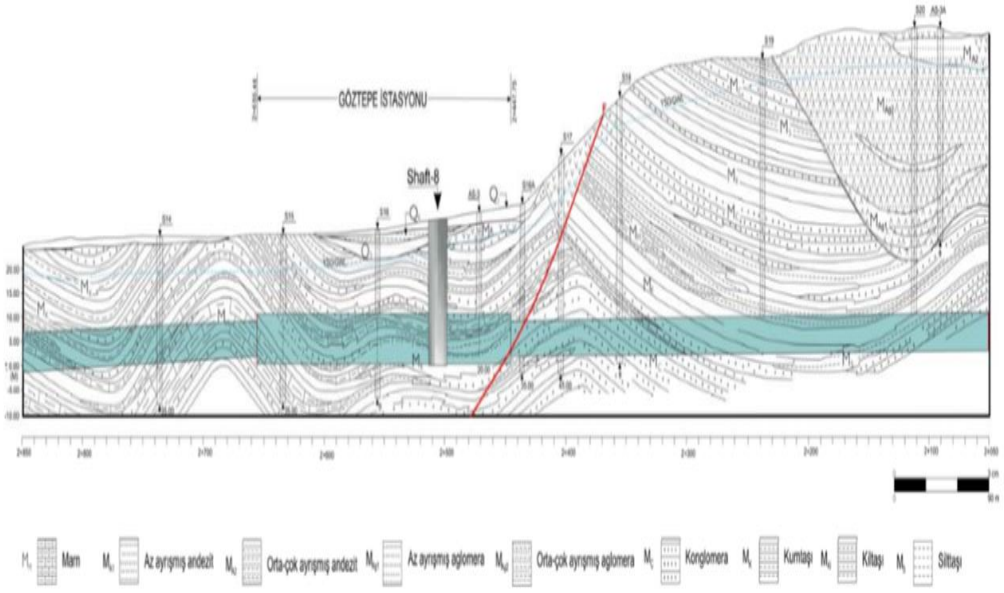
3.1.2. İzmir Göztepe İstasyonu Civarındaki Zemin Parametreleri

Bu çalışmada Türkiye' nin Ege Bölgesi' nde yer alan İzmir ilinde 5640 m uzunluğunda inşa edilmiş olan İzmir Metro Tüneli Projesinin içerisinde 2. aşama olarak planlanmış Göztepe istasyonunda, tünel inşaatı boyunca riskli görülen fay zonu bölümü dikkate alınmıştır (Kun, 2010) (Şekil 3.21). Göztepe istasyonun yer aldığı

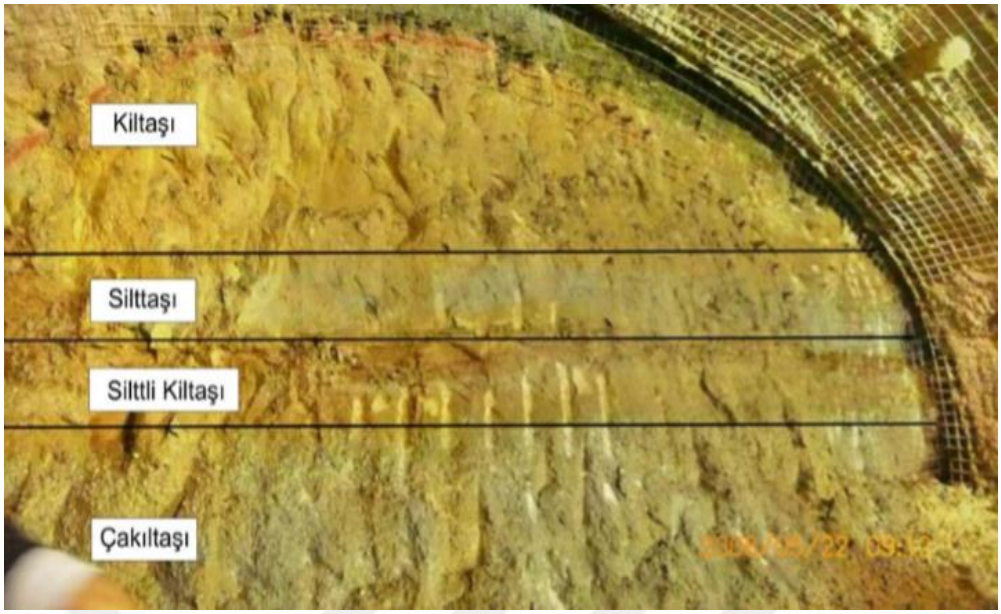
tünel hattı dikkate alındığında fay zonu çevresinde yer alan zeminin jeolojik yapısı ve tünel açma işlemi tamamlandıktan sonraki fayın durumu Şekil 3.22' de gösterilmektedir. Tünel aynası göz önüne alındığında çalışma bölgesinde yer alan jeolojik birimler Şekil 3.23' te olduğu gibi saptanmıştır.



Şekil 3.21. İzmir Metro Tüneli II. etap güzergahına ait uydu görüntüsü (Kun, 2010)



Şekil 3.22. Fay zonu çevresinde yer alan zeminin jeolojik yapısı ve tünel açma işlemi tamamlandıktan sonraki fayın durumu (Kun, 2010)



Şekil 3.23. Tünel aynasının çalışma bölgesinde yer alan jeolojik birimler (Kun, 2010)

Bu çalışma kapsamında oluşturulan model dahilinde, tünel inşaatının gerçekleştirileceği güzergah ile ilgili verilen bilgiler göz önüne alındığında, kullanılan malzemelerin γ_n (doğal yoğunluk), E (elastisite modülü), ν (poisson oranı), c' (kohezyon değeri) ve ϕ' (içsel sürtünme açısı) özellikleri Çizelge 3.3.'te sunulmuştur.

Çizelge 3.3. Materyal özellikleri (Kun, 2010' dan düzenlenerek)

Materyal	γ_n (kN/m^3)	E (MPa)	ν	c' (MPa)	ϕ' (°)
Andezit (MC)	21	64500	0.3	0.3	42
Alüvyon Dolgu (MC)	13	115	0.36	0.065	17
Kiltaşı (MC)	18	580	0.35	0.18	18
Püskürtme Beton (LE)	25	33000	0.2	-	-
Ezik Zon (MC)	16	100	0.42	0.062	15
Radye Temel (LE)	25	33000	0.2	-	-
D. Duvar (LE)	25	33000	0.2	-	-
Bulon (LE)	25	20000	0.2	-	-
İksa (LE)	78	215000	0.27	-	-
Beton Bina (LE)	25	43000	0.2	-	-

3.2. Yöntem

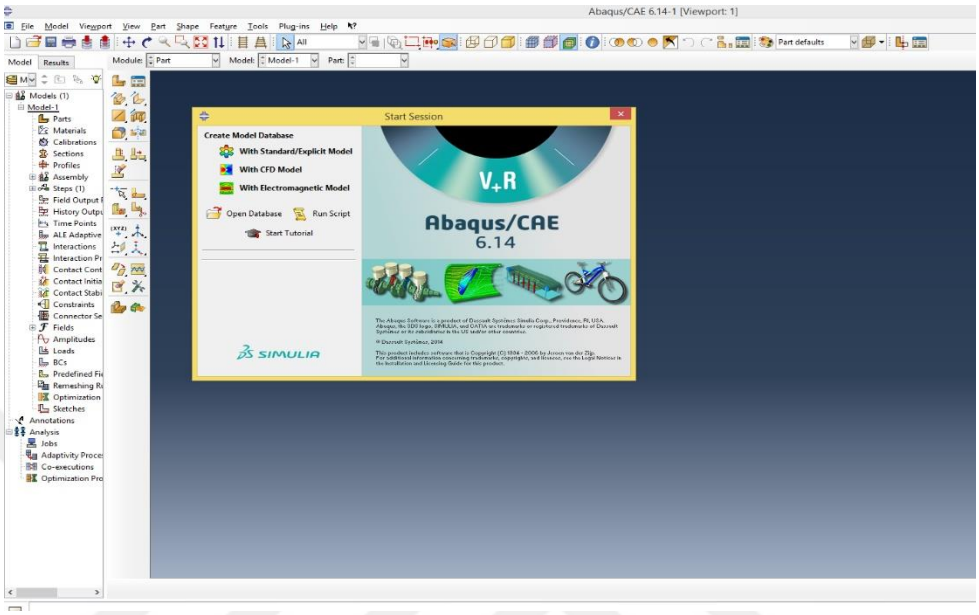
Bu çalışmada, İzmir Göztepe Metro İstasyonu bölgesindeki fay zonundan geçen ve Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi kullanılarak açılan tünelin radye temel performansına etkisini araştırmak amacıyla üç boyutlu (3B) sonlu elemanlar (SE) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem sözü edilen sistemlerin çözümü için uygun bulunmakta ve önerilmektedir. Arazi testleri ve litaretürdeki çalışmalardan yararlanarak sistemin üç boyutlu modeli oluşturulmuş olup yine üç boyutlu (3B) sonlu elemanlar (SE) yöntemini temel alan programlar ve algoritmalar kullanılarak bu model üzerinde yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar, önceki çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Yapılan bu kıyaslara çalışmanın 'Araştırma Bulguları ve Tartışma' kısmında yer verilmiştir.

3.2.1. Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar metodu, karşılaşılabilecek çeşitli türdeki mühendislik sorunlarına karşı mantıklı çözümler sunan sayısal bir metottur. Bu metot sayesinde biyomekanik, katı ve sıvı mekaniği, akustik ve elektromanyetizma gibi değişik sorunlara çözüm sağlanabilir. Metot, karmaşık sınır şartları içeren problemlere, lineer ve lineer olmayan sistemlere ve düzgün geometriye sahip olmayan sistemlere tatbik edilmiştir. İlk olarak metot, gerilme analizi sorunlarına çözüm bulmak için uygulanmıştır. Sonlu elemanlar metodunda analizi gerçekleştirilecek örgü sistemi önceden belirlenmiş olan parçalara ayrılır ve bu parçalar 'nod' olarak adlandırılan noktalar sayesinde bir araya getirilerek bir denklem takımı kurulur. Kurulan bu karmaşık denklem takımlarının analizi bilgisayar programları (yazılımları) aracılığıyla sağlanmakla birlikte sistem etkin bir şekilde çözülmüş olur.

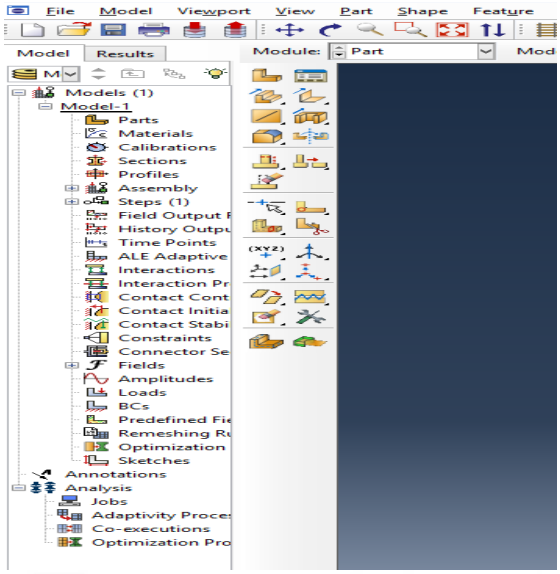
Bu tez çalışması kapsamında oluşturulan üç boyutlu modellerin analizleri sonlu elemanlar metodu tabanlı programlar ve algoritmalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar metodu ile işlem yapan bu programlar ve algoritmalar kullanıcının istediği şekilde analiz yapmasına imkan tanıdığından akademik çalışmalarda oldukça tercih edilir hale gelmiştir.

Sonlu elemanlar metodu tabanlı programı kullanmaya başlarken programın simgesine çift tıklanır ve kullanıcı Şekil 3.24.' te görüldüğü gibi programın ara yüz ekranı ile karşılaşır.



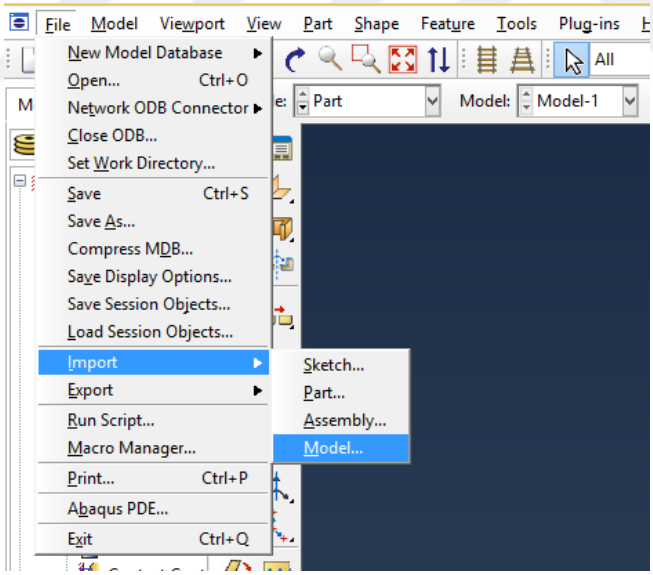
Şekil 3.24. Sonlu elemanlar metodu tabanlı programın ara yüz ekranı

Programın ara yüz ekranının solunda çalışma ağacı yer almaktadır. Program açıldığında mevcut olarak 'Model-1' isminde işlem yapılmamış bir model oluşturulur ve gerçekleştirilen işlemler bu model kapsamında devam eder. Kullanıma bağlı olarak kullanıcı tarafından bu model silinerek başka bir model oluşturulabilir veya dış ortamdan başka bir model import etme metodu ile programın içerisine aktarılarak kullanılabilir. Şekil 3.25.' te programın ara yüzünde yer alan çalışma ağacı gösterilmektedir.



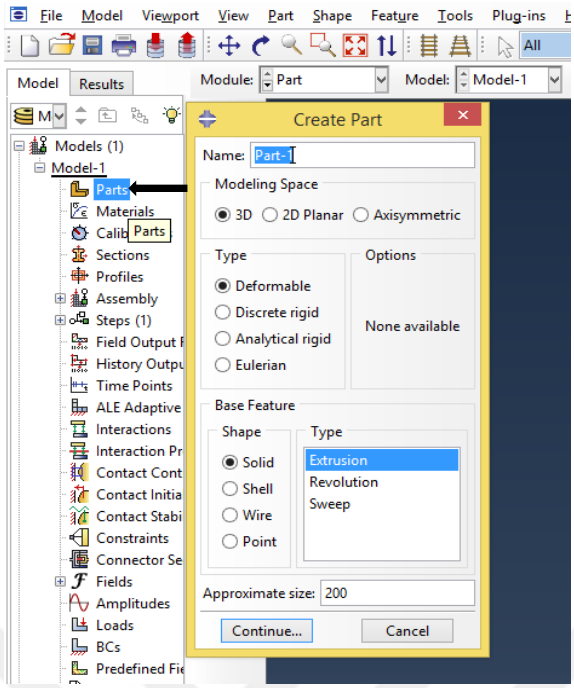
Şekil 3.25 Sonlu elemanlar metodu tabanlı programın ara yüzünde yer alan çalışma ağacı

Programın içerisinde bulunmayan dış ortamdaki bir modeli programa aktarmak amacıyla file içerisindeki 'import' komutu kullanılır.

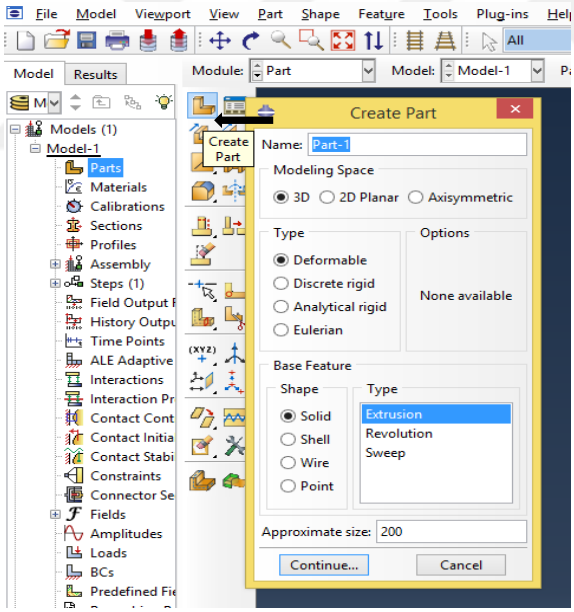


Şekil 3.26. Dış ortamdan var olan bir modelin programa aktarılması

Programın çalışma ağacında model menüsünün içerisinde bulunan 'Parts' sekmesine çift tıklanarak (Şekil 3.27.) veya ara yüzde çalışma ağacının hemen sağında yer alan araç çubuğunda bulunan 'Create Part' ikonuna tıklanarak (Şekil 3.28.) istenilen parça oluşturulabilir.



Şekil 3.27. Parts sekmesine tıklanarak model için kullanılmak üzere parça oluşturma

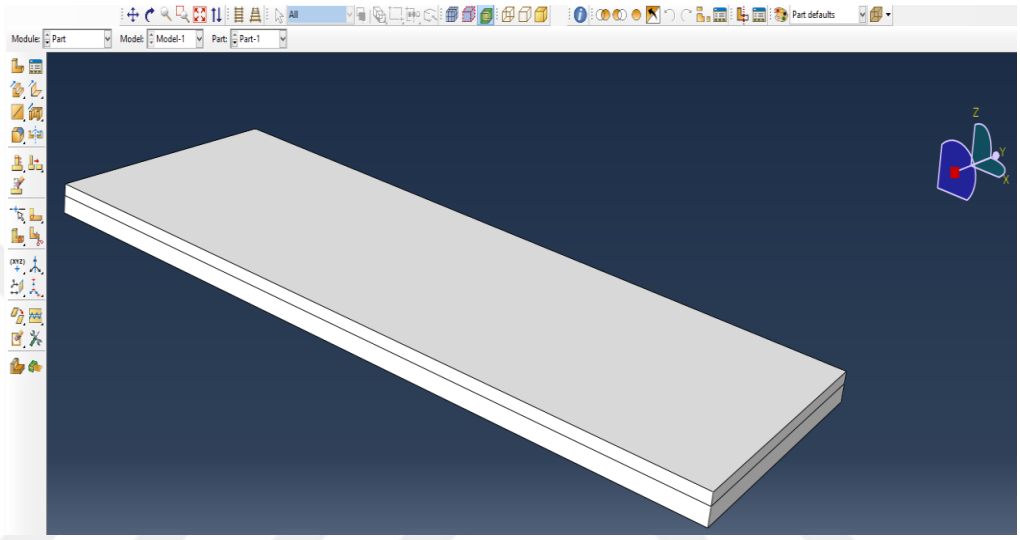


Şekil 3.28. Create part ikonuna tıklanarak model için kullanılmak üzere parça oluşturma

Parça oluşturmak amacıyla açılan pencereye bakacak olursak ‘Modeling Space’ kısmında modelin üç boyutlu (3D) mu, iki boyutlu (2D Planar) mu yoksa eksenel simetrik olarak mı çözüleceği seçeneklerini kullanıcıya sunar. Aynı zamanda kullanıcı tarafından oluşturulacak parçanın ‘Type’ kısmından tipi ve özellikleri belirlenir. Oluşturulacak parçanın ‘Shape’ kısmında katı model mi (solid), kabuk eleman mı

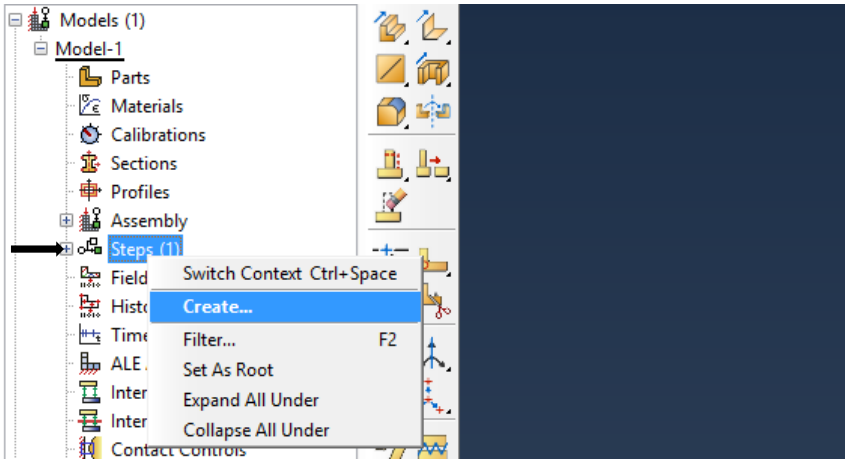
(shell), çizgisel (wire) veya noktasal mı (point) olacağı belirlenebilir. Aynı zamanda bu pencereden modelin oluşturulma biçimi de belirlenmektedir.

Kullanıcı model için çalışmasına uygun yöntemi seçtikten sonra parça oluşturulur. Sonlu elemanlar metodu tabanlı programda katı modelleme (solid) yöntemi ile oluşturulmuş parça Şekil 3.29. ' da gösterilmektedir.



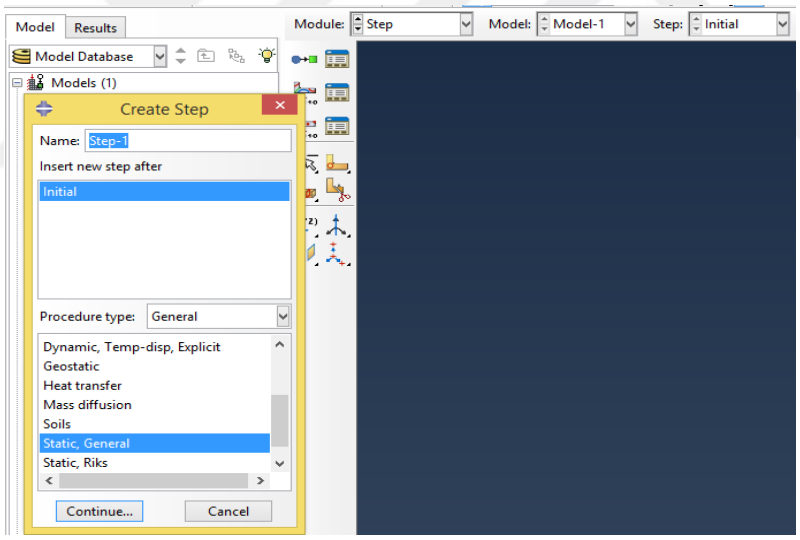
Şekil 3.29. Program üzerinde model için oluşturulan bir örnek

Programda modelin tasarımı yapıldıktan sonra analizin gerçekleştirilmesi amacıyla adım (step) tanımlanmalıdır. Programda ilk adım başlangıç olarak oluşturulmuştur. İlk adımdan sonra gerçekleştirilecek işlemler için yeni adım oluşturulur. Örnek verecek olursak, modele yük uygulanacak ise yükleme işlemi için adım oluşturulur ve oluşturulan yükleme adımı için gerekli işlemler gerçekleştirilir. Şekil 3.30. ' da programda adım (step) oluşturma işlemi gösterilmektedir.



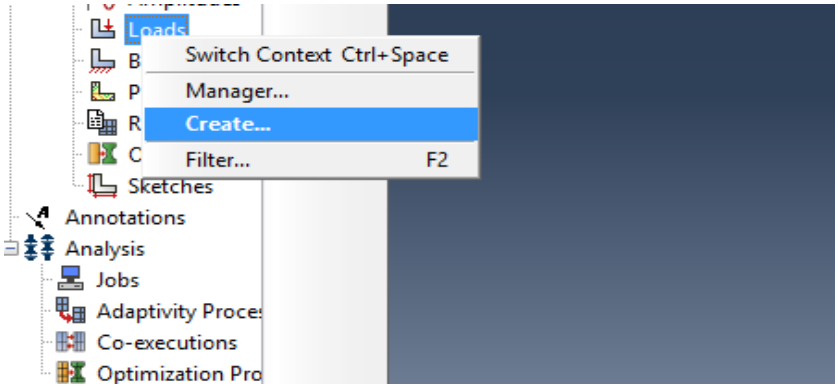
Şekil 3.30. Programda adım (step) oluşturma

Step sekmesine sağ tıklanarak açılan pencerede 'Create' seçeneğine tıklandığında Şekil 3.31.' de görüldüğü gibi oluşturulan adımı (step) detaylandırmak için pencere açılır.



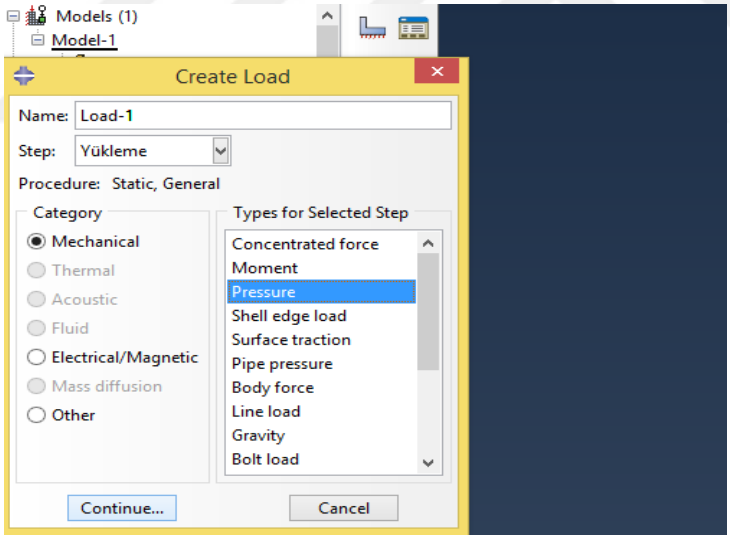
Şekil 3.31. Programda adım (step) detaylandırma penceresi

Adım oluşturma işlemi tamamlandıktan sonra Şekil 3.32.' de gösterildiği gibi yük tanımlama işlemine geçilir.



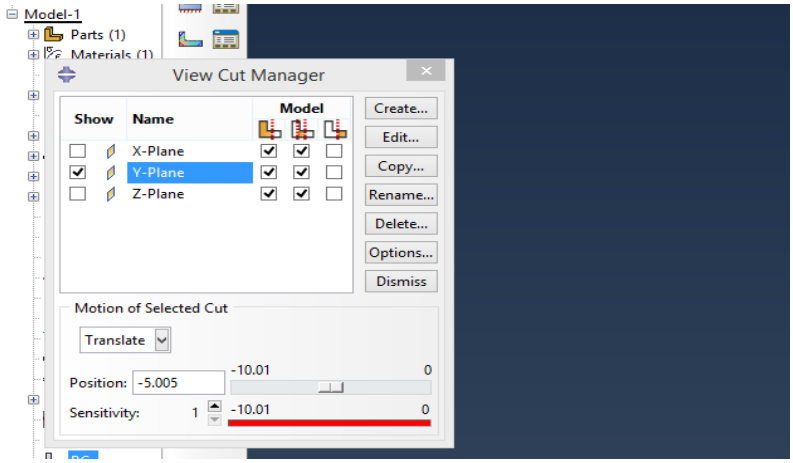
Şekil 3.32. Program üzerinde yük tanımlama

Load sekmesine sağ tıklanarak açılan pencerede 'Create' seçeneğine tıklandığında Şekil 3.33.' te görüldüğü gibi yük oluşturmak amacıyla programın ara yüz ekranında pencere açılır. Açılan pencerede yükleme için gerekli olan veriler (yük kategorisi ve yük tipi gibi) girilir ve yük (load) penceresi onaylanarak (continue) kapatılır.



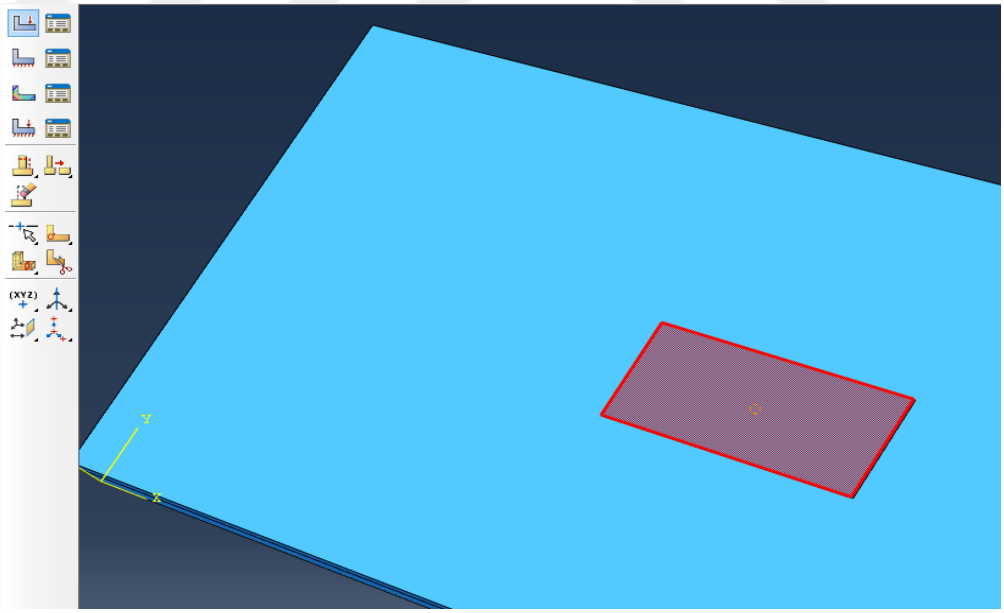
Şekil 3.33. Yük tanımlama penceresi

Yük penceresi kapatıldıktan sonra program yükün uygulanacağı yerin seçilmesini ister. Yükün uygulanacağı yerin seçimi için yapılan işlem Şekil 3.34.' de gösterilmiştir.



Şekil 3.34. 'View Cut Manager' ikonuna tıklanarak açılan pencere

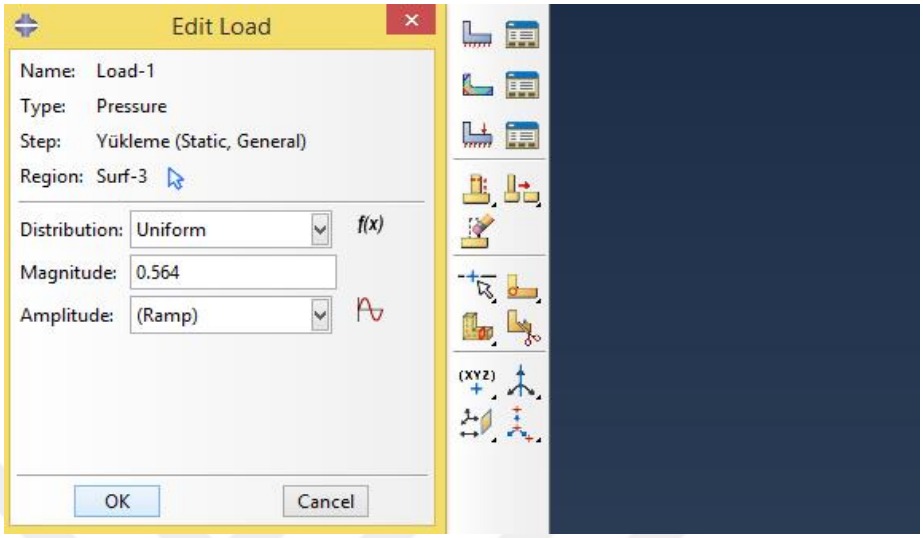
Üç boyutlu ortamda yüzey seçme işleminin daha kolay gerçekleştirilebilmesi amacıyla 'View Cut Manager' sekmesi kullanılarak görüntü istenildiği gibi değiştirilebilir. Bu durum model üzerindeki yüzeyin seçimini kolaylaştırır. Şekil 3.35.' te model üzerinde yükün tatbik edileceği yüzeyin seçilmiş haldeki görüntüsü sunulmaktadır.



Şekil 3.35. Yükün etkitileceği yüzeyin seçimi

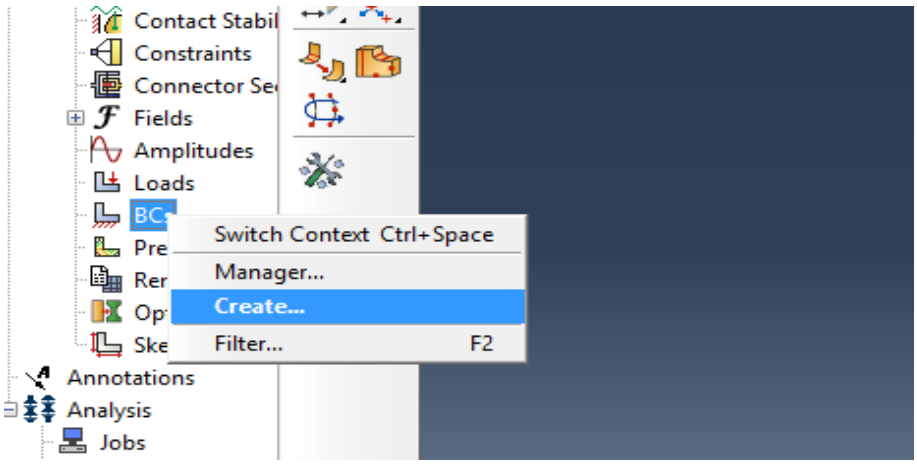
Yüzey seçim aşaması tamamlandıktan sonra Şekil 3.36.' da görüldüğü gibi yük değerinin (magnitude) belirtileceği bir pencere program ara yüzüne gelir. Yükün

değeri belirtildikten sonra program ara yüzündeki pencere onay verilerek kapatılır. Böylece yük istenilen yüzeye tatbik edilmiş olur.



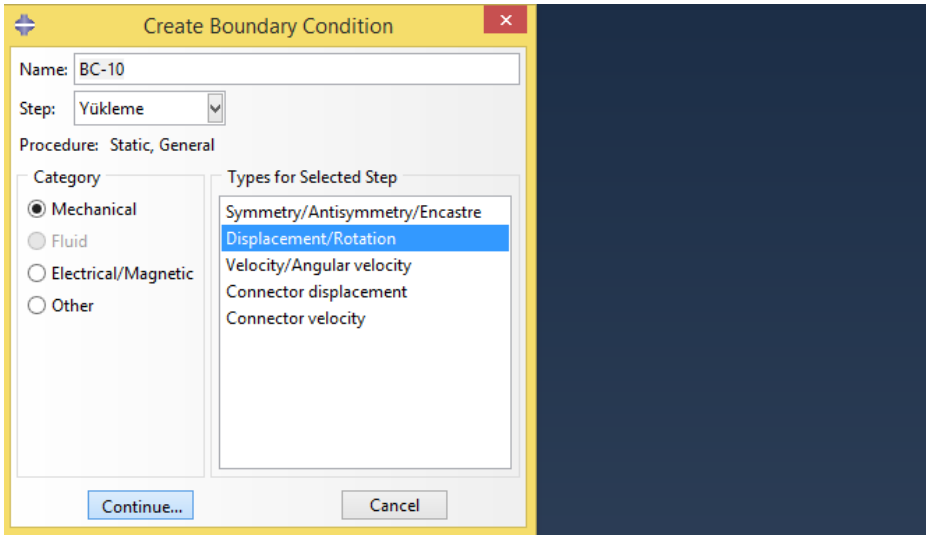
Şekil 3.36. Yük değerinin (magnitude) belirtildiği pencere

Program kullanılarak analizi gerçekleştirilecek model için belirlenen yüzeye yük tanımlaması yapıldıktan sonraki aşamada modelin sınır şartlarının tayin edilmesi gerekmektedir. Şekil 3.37.' de modelin sınır şartlarının belirlenmesi gösterilmektedir.



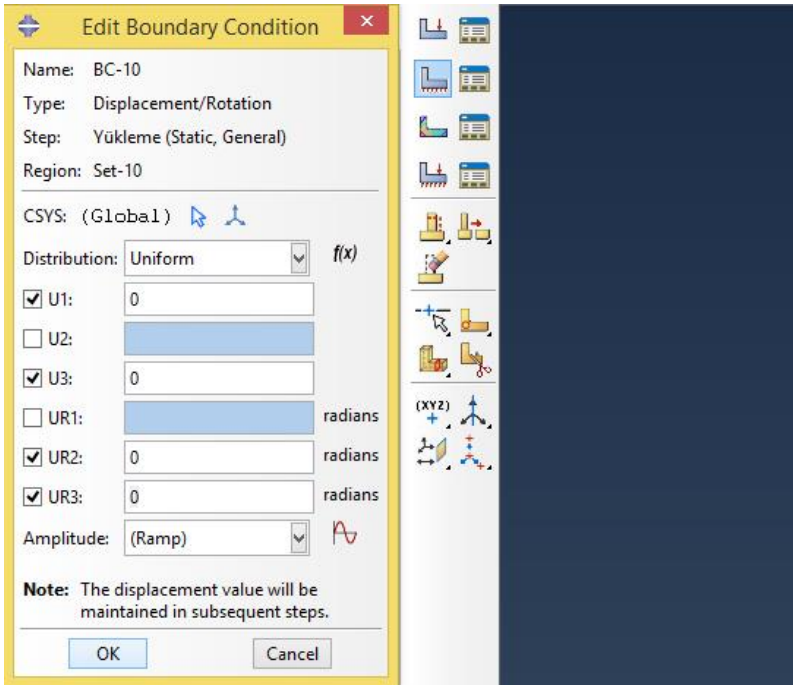
Şekil 3.37. Modelin sınır şartlarının oluşturulduğu başlangıç aşaması

'Create' seçeneğine tıklanıldığında sınır şartlarını oluşturmak üzere program ara yüzünde Şekil 3.38.' de gösterildiği gibi sınır şartlarının belirtileceği pencere açılır.



Şekil 3.38. Sınır şartlarını oluşturma penceresi

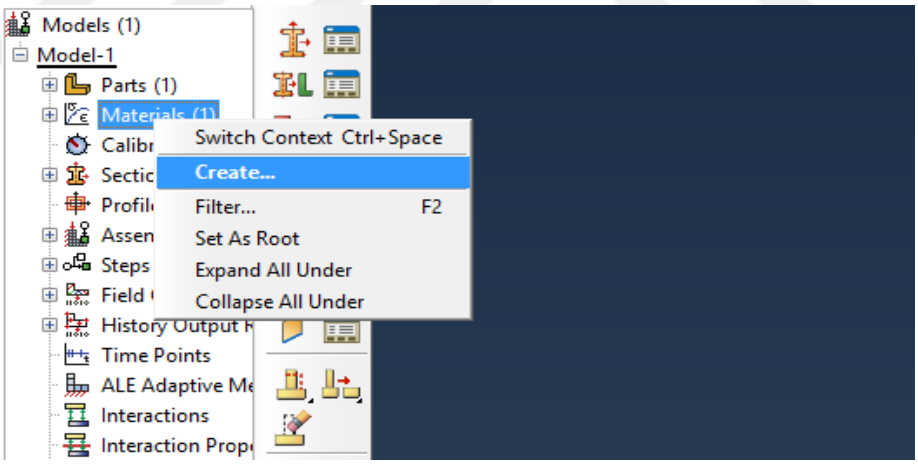
Yapılan tasarım dikkate alındığında sınır şartlarının türü belirlendikten sonra program tarafından model üzerindeki yüzeylerin hangilerine sınır şartlarının uygulanacağı kullanıcıya sorulur ve seçim işlemi kullanıcı tarafından gerçekleştirilir. Kullanıcı tarafından seçim işlemi tamamlandıktan sonra sınır şartlarının hangi yönde uygulanacağı ile ilgili Şekil 3.39.' da görüldüğü gibi ekran ara yüzünde bir pencere açılır.



Şekil 3.39. Program ara yüzünde sınır şartlarına ait yönlerin seçildiği pencere

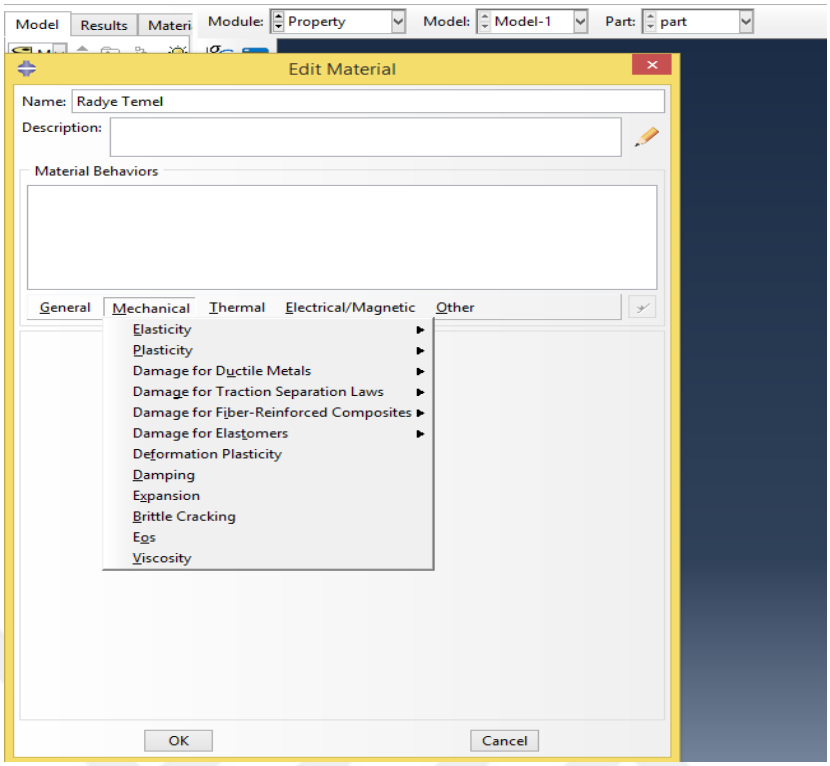
Model üzerindeki diğer yüzeylerde de sınır şartları benzer şekilde belirlenir. Sınır şartları belirlendikten sonra doğru şekilde tanımlanıp tanımlanmadığı program ağacına bakılarak kontrol edilebilir. Modelde yer alan parçaların materyal özelliklerinin tanımlanması birkaç aşamada gerçekleştirilir. Modele ait parçalar sonlu elemanlar metodu tabanlı programda tasarlanmış ise her bir parça için materyal özellikleri belirtilmeli, bölüm oluşturulmalı ve bölüm tanımlaması yapılmalıdır. Eğer modele ait parçalar başka bir programda oluşturulup içe aktarma (import) yöntemiyle programa entegre edilmiş ise parçalar dikkatle incelenmelidir. Eğer import edilen parçalarda bölüm tanımlaması gerçekleştirilmiş ise sadece materyal oluşturulması veya oluşturulmuş ise özelliklerinin modele uygun şekilde düzenlenmesi sağlanarak tasarıma seyrinde devam edilir. Abaqus programı içerisinde tasarlanmış bir parça için ilk olarak materyal tanımlama işlemi gerçekleştirilir.

Materyal tanımlama işleminin ilk aşaması Şekil 3.40.' ta sunulmaktadır. İlk aşamada 'Create' seçeneğine tıklanarak yeni materyal oluşturulması sağlanmış olur.



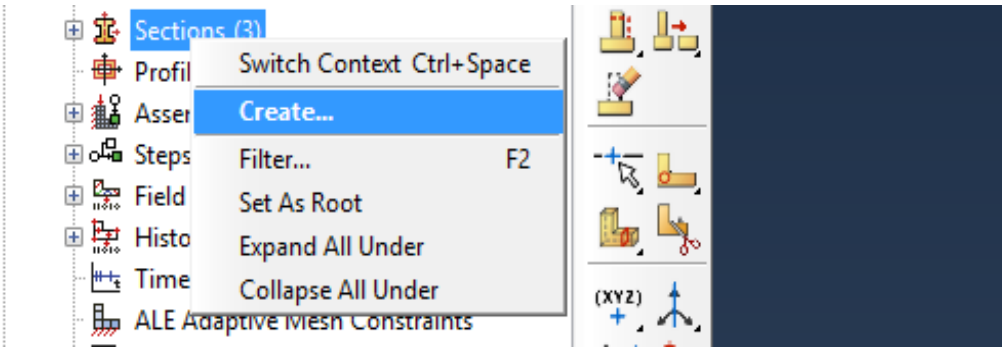
Şekil 3.40. Malzeme tanımlanmasının ilk aşaması

İlk aşamadan sonra malzeme özelliklerinin tanımlanacağı pencere Şekil 3.41.' de olduğu gibi programın ara yüzünde açılır.



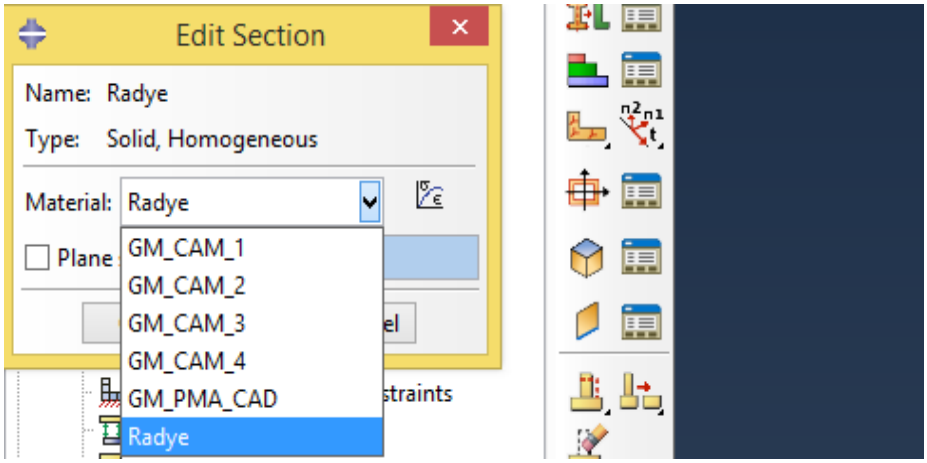
Şekil 3.41. Malzeme özelliklerinin tanımlanması

Parça için malzeme özelliklerinin belirtilmesinin ardından bölüm oluşturma işlemine geçilir. Program ara yüzünün sol tarafında bulunan çalışma ağacında yer alan 'Sections' bölümüne sağ tıklandığında açılan menüde 'Create' işlemi yapılarak Şekil 3.42.' de görüldüğü gibi bölüm oluşturma işlemi gerçekleştirilir.



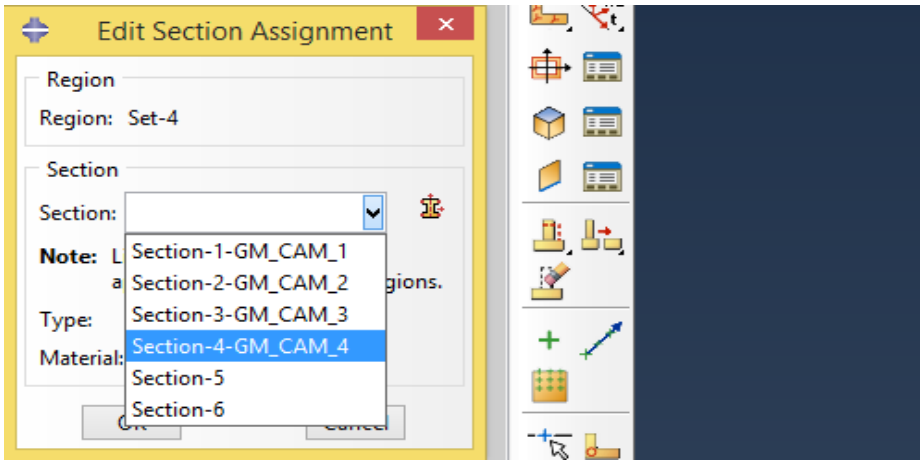
Şekil 3.42. Parça için bölüm tanımlama

Bu aşamadan sonra parça için oluşturulan bölüme ait malzemenin tanımlanması için program ara yüzünde Şekil 3.43.' te görüldüğü bir pencere ekrana gelir ve parça için tasarlanan bölümün malzeme tanımlama işlemi gerçekleştirilir.



Şekil 3.43. Parça için oluşturulan bölümün malzeme tanımlaması

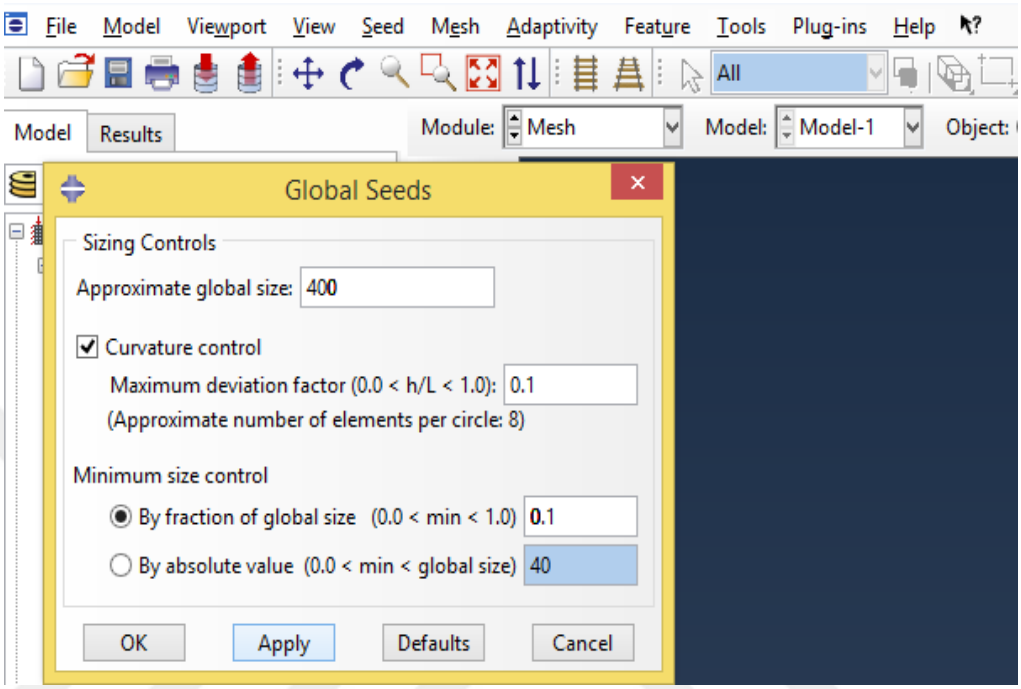
Parça için bölüm oluşturma işlemi gerçekleştirilip malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra bölüm tanımlama işlemi de tamamlanarak parça için malzeme tanımlama konusu tamamlanmış olur. Parça için bölüm tanımlama işlemini gerçekleştirmek için çalışma ağacından ilgili parça tespit edilir. 'Section Assignment' seçeneğinden 'Create' seçeneğine tıklanarak ilk aşama tamamlanır. Bu aşamadan sonra bölüm tanımlama işleminin gerçekleştirileceği pencere Şekil 3.44.' te gösterildiği gibi programın ara yüz ekranına gelir.



Şekil 3.44. Parça için bölüm tanımlaması yapılması

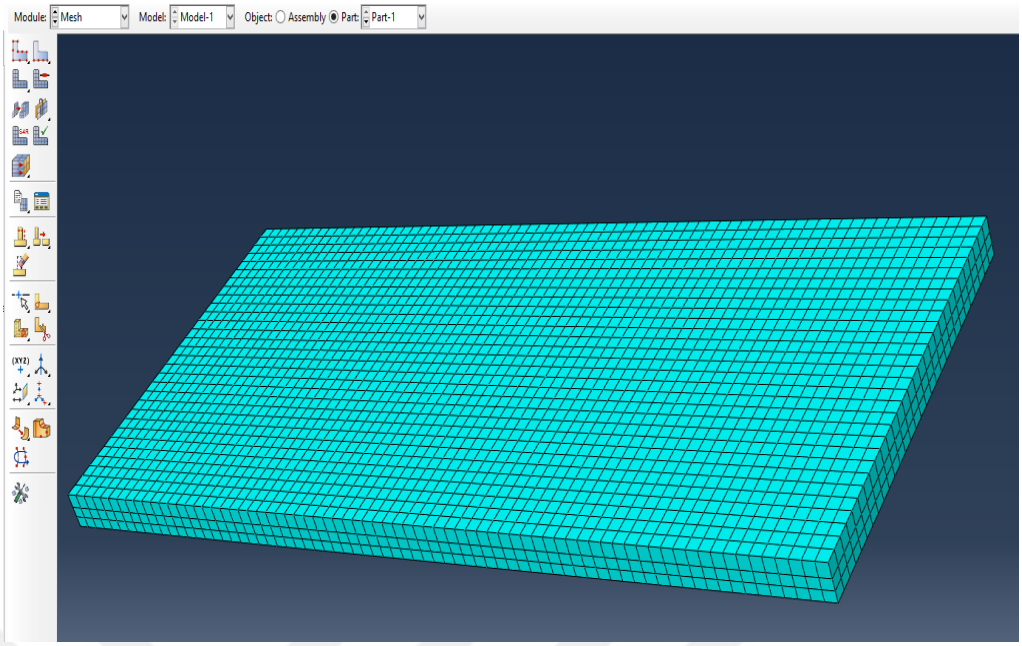
Sonlu elemanlar metodu tabanlı programda modelleme işlemi gerçekleştirilen bir parçanın sağlıklı bir şekilde analiz edilebilmesi için sonlu elemanlara bölme işleminin uygulanması gerekmektedir. Bu nedenle ilk olarak programın üst araç çubuğunda 'Module' menüsü içerisindeki 'Mesh' seçeneğine tıklanır. Daha sonra araç

çubuğundaki ‘Seed’ menüsünde yer alan ‘Part’ seçeneği tıklanır. Bu işlem ile birlikte Şekil 3.45.’ teki gibi program ara yüzünde bir pencere açılır ve gerekli veriler girildikten sonra onaylama (apply) işlemi gerçekleştirilir.



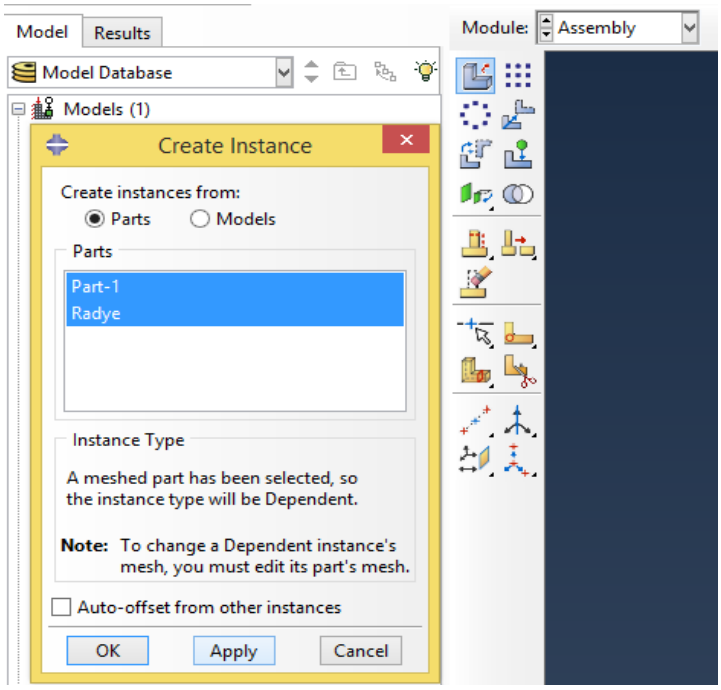
Şekil 3.45. Sonlu elemanlara bölme işlemi için verilerin girildiği pencere

Bu işlemden sonra üst araç çubuğundan ‘Mesh’ menüsü içerisindeki ‘Part’ seçeneğine tıklandıktan sonra onaylama işlemi yapıldığında parça için mesh işlemi tamamlanmış olur. Şekil 3.46.’ da sonlu elemanlara bölme işlemi tamamlanmış parça görülmektedir.



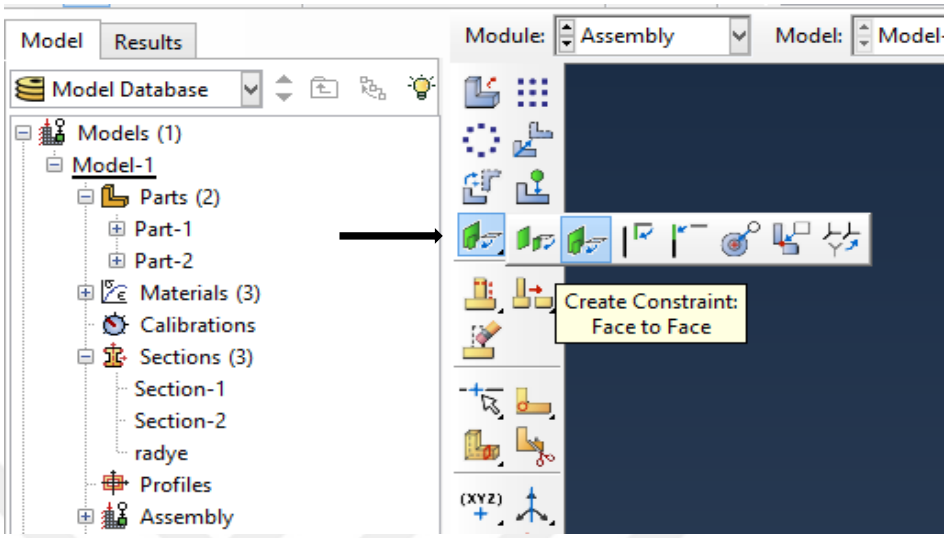
Şekil 3.46. Sonlu elemanlara bölme işlemi tamamlanan parçanın görüntüsü

Bazı durumlarda söz konusu programda model için oluşturulan parçalar birleştirilmek istenir. İşlem, program ağacında yer alan 'Create Instances' ikonuna tıklanarak gerçekleştirilir. Şekil 3.47.' de görüldüğü gibi program ara yüzünde açılan pencerede eklenecek parçalar seçilir.



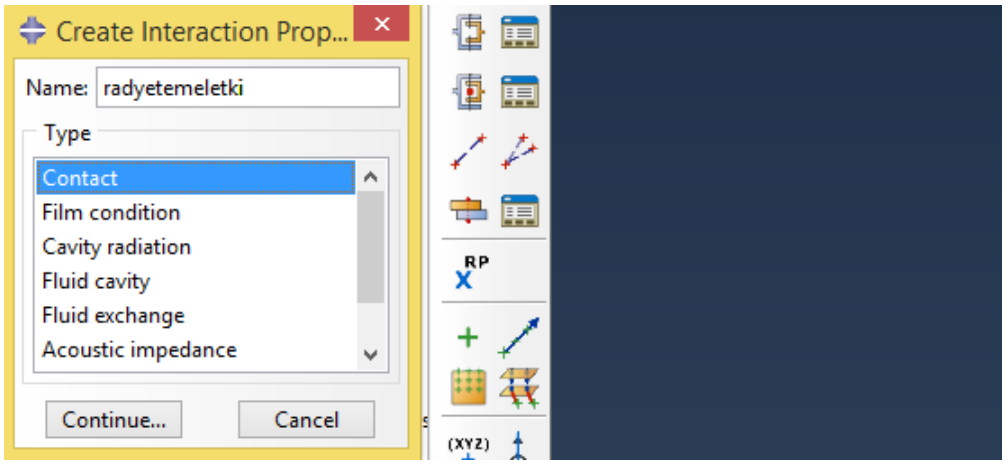
Şekil 3.47. Parçaların aynı pencereye toplanması

Aynı çalışma ortamında yer alan ancak bitişik olmayan parçaları bir araya getirerek birleştirmek amacıyla 'Face to face' komutu kullanılabilir (Şekil 3.48.).



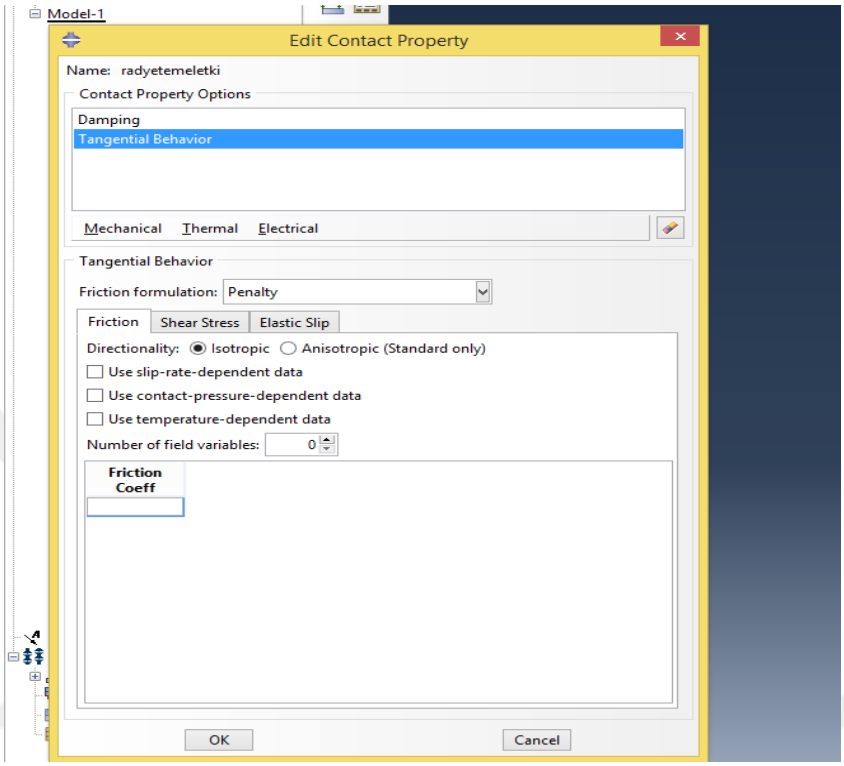
Şekil 3.48. Parçaların birleştirilmesi işlemi

Model oluşturulurken üst üste yerleştirilen parçalar arasında sağlıklı bir şekilde yük aktarımının sağlanabilmesi için bir etkileşim tanımlama işlemi gerekebilir. Bu sebeple programa parçaların temas eden yüzeyleri arasındaki sürtünme değerlerinin girilmesi gerekebilir. İşlem gerçekleştirilirken, ilk olarak program ağacında yer alan 'Interactions Properties' bölümünden Şekil 3.49.' da sunulduğu üzere etkileşim özelliği oluşturulmalıdır.



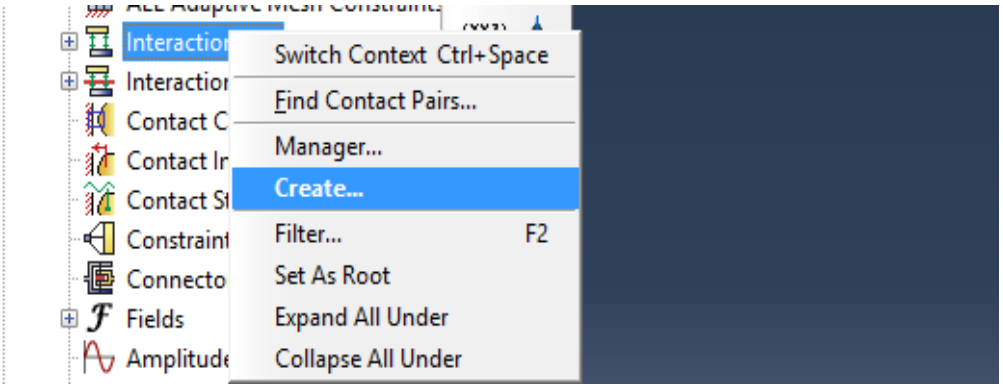
Şekil 3.49. Interactions Properties ile etkileşim özelliği oluşturma

Bir sonraki aşama da ise yüzeyler arası sürtünmeyi tanımlamak üzere program ara yüzünde bir pencere açılır. Şekil 3.50.' de görüldüğü gibi parçaların temas eden yüzeyleri arasındaki sürtünme değeri açılan pencere üzerinden programa tanımlanır.



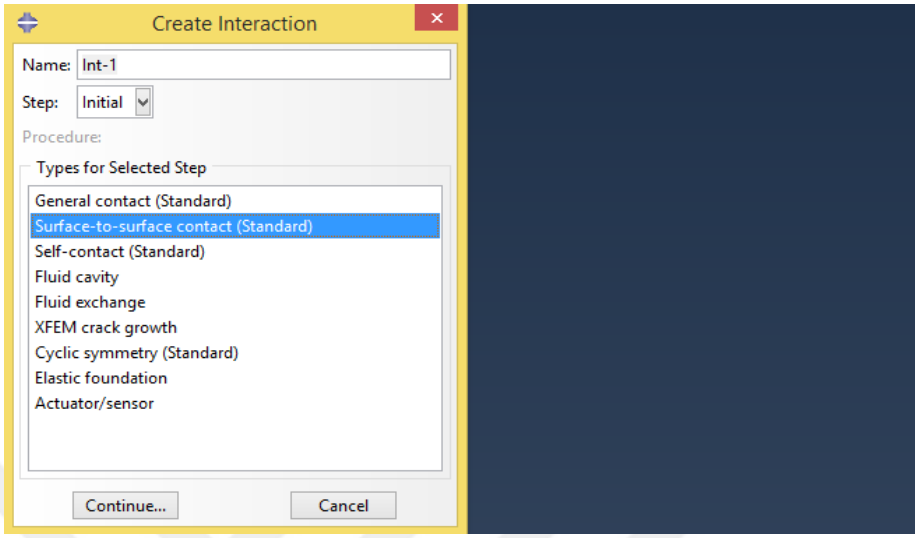
Şekil 3.50. Yüzeyler arasında sürtüneme değerinin girilmesi

Ardından çalışma ağacında yer alan 'Interactions' seçeneğine sağ tıklayarak açılan menüde 'Create' seçeneği seçilerek etkileşim tanımlamak için Şekil 3.51.' de gösterildiği gibi ilerlenilir.



Şekil 3.51. Etkileşim tanımlama

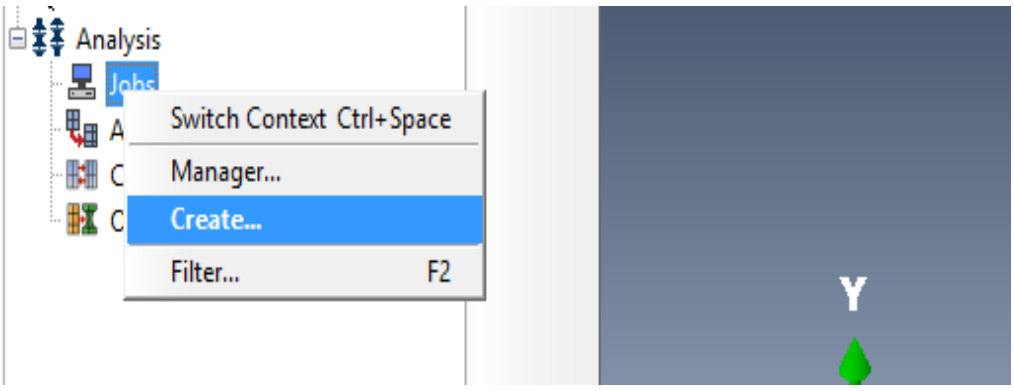
Bir sonraki aşamada program ara yüzünde Şekil 3.52.' de sunulduğu gibi bir etkileşim menüsü açılır.



Şekil 3.52. Etkileşim türünün belirlendiği menü

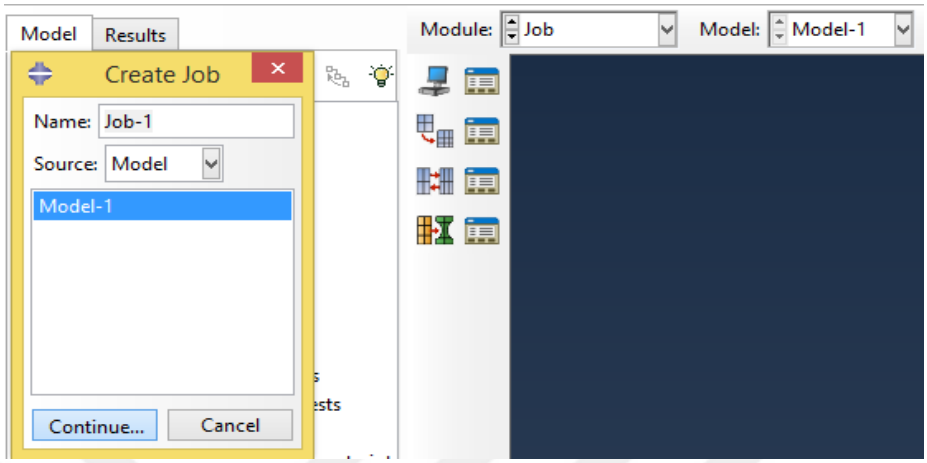
Etkileşim türü belirlenirken iki yüzeyin birleştirilmesi isteniyor ise 'Surface-to-surface contact' seçeneği seçilir ve onaylama işlemi gerçekleştirilir. Onaylama işleminin (continue) ardından kullanıcı tarafından parçaların etkileşim sağlayacak olan yüzeyleri seçilir. Şuana kadar gerçekleştirilen tüm işlem adımları tamamlandıktan sonra analiz aşamasına geçilebilir.

Kullanılan programda analizi başlatmak amacıyla ilk olarak Şekil 3.53.' te görüldüğü gibi 'Jobs' oluşturulmalıdır.



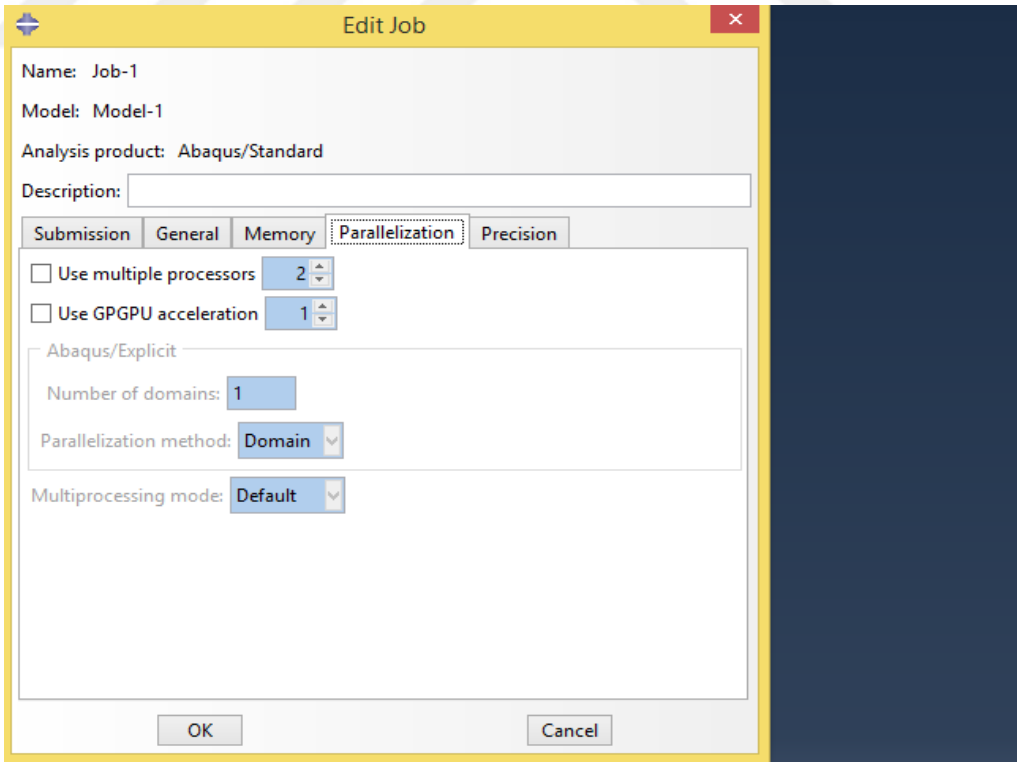
Şekil 3.53. Kullanılan programda job (iş) oluşturma

Bu aşamadan sonra program ara yüzünde Şekil 3.54.' te görüldüğü gibi bir pencere açılır.



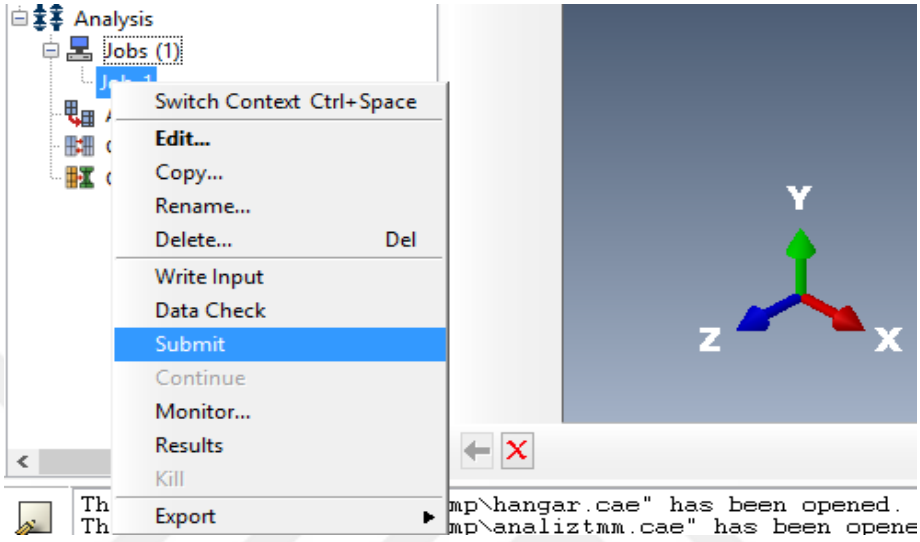
Şekil 3.54. İş (job) oluşturma penceresi

Bir sonraki aşamada analiz ayarlarının oluşturulduğu bir pencere Şekil 3.55.' teki gibi program ara yüzünde açılır.



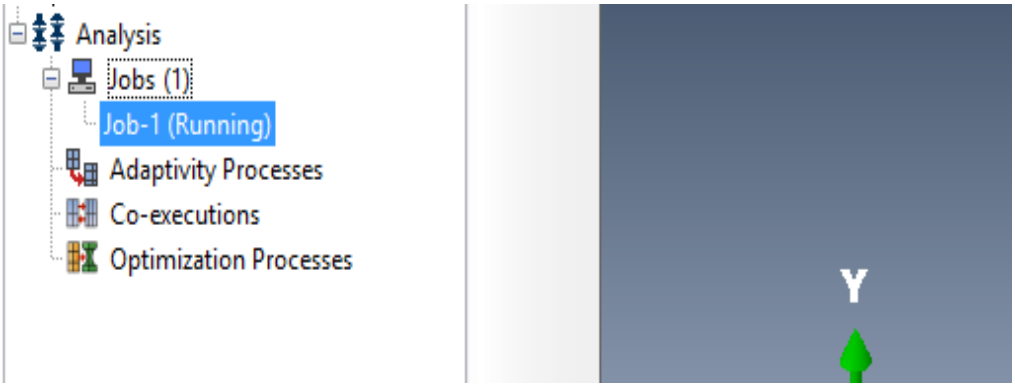
Şekil 3.55. Analiz ayarlarının oluşturulması

Abaqus programı kullanıcısına analiz ayarlarının oluşturulduğu pencerede istediği şekilde analiz yapması için pek çok seçenek sunar. Kullanıcı analiz ayarlarını kendi tasarımına uygun olacak şekilde yapmalıdır. Analiz Şekil 3.56.' da görüldüğü gibi 'Submit' seçeneğine tıklanarak başlatılabilir.



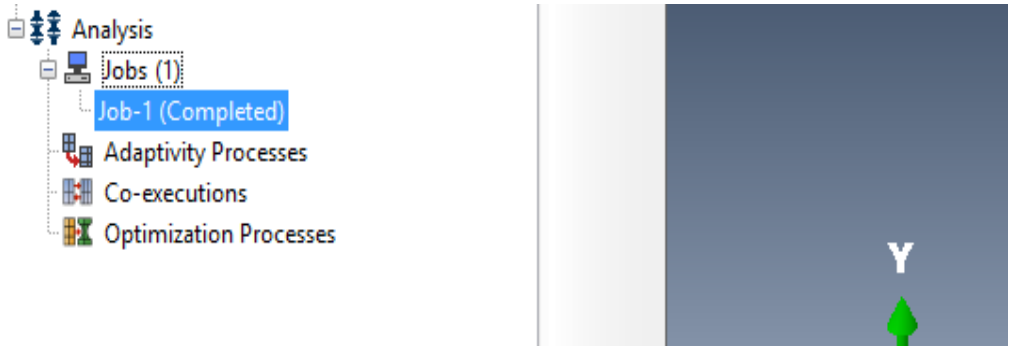
Şekil 3.56. Analiz işleminin başlatılması

Analiz aşaması doğru bir şekilde başlatılırsa Şekil 3.57.' de görüldüğü gibi analizi gerçekleştirilen dosyanın yanında (Job-1) analizin devam ettiğini gösteren 'Running' metni çıkar.



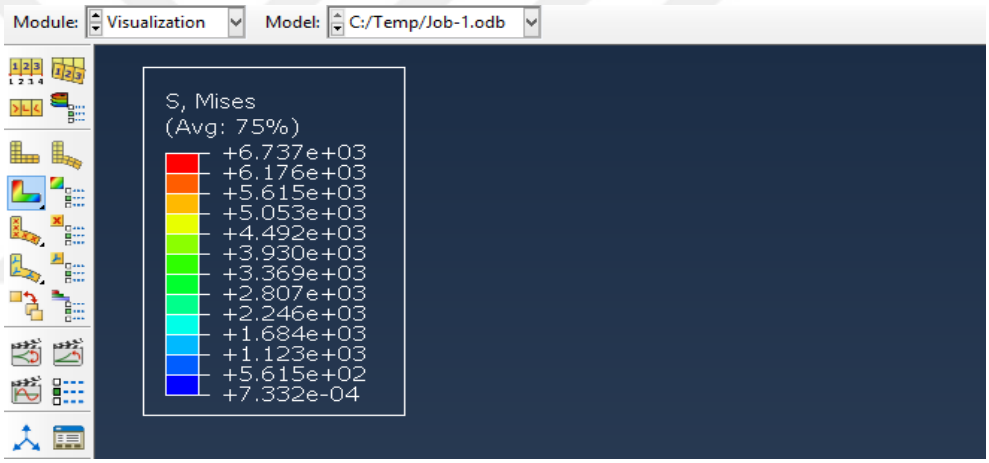
Şekil 3.57. Analizin sürdüğünü gösteren metin

Analiz işlemi sonlandığı zaman analizi gerçekleştirilen dosyanın sağında analizin sonlandığını ifade eden 'Completed' metni Şekil 3.58.' de olduğu gibi görünür.



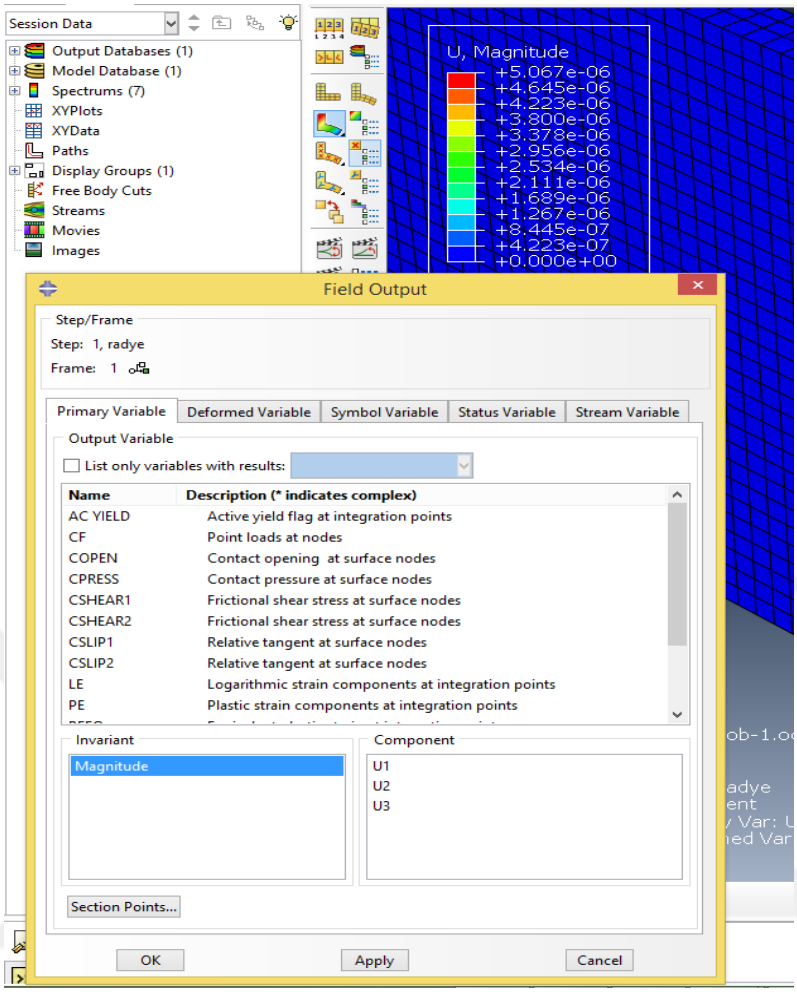
Şekil 3.58. Analizin sonlandığını gösteren uyarı

Sonuçlara ulaşmak amacıyla analizi sonlanan dosyaya ((Job-1 (Completed)) sağ tıklanıldığında açılan menü içesindeki 'Results' seçeneğine tıklanır. Analiz sonuçları Şekil 3.59.'daki gibi program ara yüzünde görünür.



Şekil 3.59. Örnek analiz sonuçları göstergesi

Tercih edilen program ve algoritmalar kullanıcıya gerçekleştirilen analiz işlemiyle ilgili detaylı imkanlar sağladığı gibi aynı zamanda istenilen bütün noktalardaki sonuçlara ulaşma olanağı da verir. Araç çubuğunda yer alan 'Report' bölümünden detaylı sonuçlara Şekil 3.60.' da görüldüğü gibi program dışı ortama aktarma yöntemiyle de ulaşılabilir.



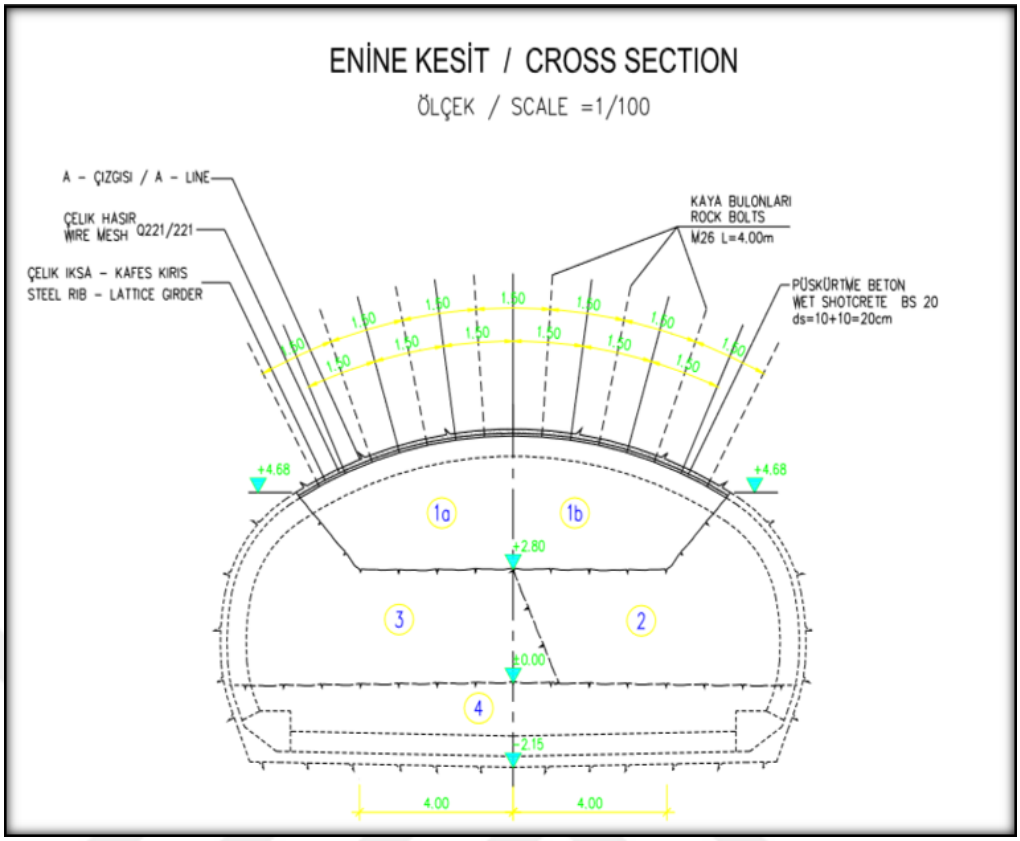
Şekil 3.60. Analiz sonuçlarının program dışı ortama aktarılması

İstenilen durumlarda tüm sonuçlar, komut verildiği taktirde detaylı bir program dışı ortam dosyası halinde dökülür ve not defteri vb. bir uygulama aracılığıyla görüntülenerek incelenmesi sağlanır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, bu tez İzmir Göztepe Metro İstasyonu bölgesindeki fay zonundan geçen ve Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi kullanılarak açılan tünelin radye temel performansına etkisi üç boyutlu (3B) sonlu elemanlar (SE) yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Üç boyutlu (3B) sonlu elemanlar (SE) yöntemi tabanlı çalışan programlar ve algoritmaların kullanılmasıyla oluşturulan 3B SE modelindeki fay zonu – NATM tünel birlikteliğinin radye temel performansına etkisi, literatürde yapılmış çalışmalar (Şeker,2008; Kucuk vd., 2009; Kun, 2010; Selman, 2014) dikkate alınarak araştırılmıştır. Bu bağlamda İzmir Metrosunun Göztepe İstasyonu civarındaki NATM uygulamasının; fay zonu, çok katlı bir yapının sahip olduğu yükün (belirlenen yapı oturum alanı dikkate alınarak) tatbik edilmesi durumu ve radye temel birlikteliği göz önüne alınarak 3B SE yöntemi ile analizi gerçekleştirilmiştir. 3B SE analizinde yapının zemin üzerinde oluşturduğu yük dikkate alınmış olup Kun' un (2010) yapmış olduğu çalışma esas alınarak efektif parametrelerin (γ_n, ϕ', E, ν, c') seçimi gerçekleştirilmiştir.

Aynı zamanda yine Kun' un (2010) yapmış olduğu çalışma dikkate alınarak modelde kullanılacak tünel tahkimatı elemanları, kazı yüksekliğinin ne kadar olacağı, iksaların konumu, püskürtme beton kalınlığı, bulonların yerleştirilme düzeni gibi bilgiler de modelin oluşturulması esnasında referans alınmıştır. Şekil 4.1.' de İzmir Göztepe İstasyonu' na ait çalışmanın gerçekleştirildiği tünel kesiti sunulmaktadır.



Şekil 4.1. İzmir Metrosu Göztepe İstasyonu tünel en kesiti (Kun, 2010)

Modellemesi yapılan NATM tünelinin analiz sonucu Kun' a (2010) ait çalışmaların sonuçları ile kıyaslanmıştır. Sonlu elemanlar metodu tabanlı program kullanılarak ulaşılan analiz sonuçlarının Kun' a (2010) ait çalışmadaki veriler ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Bu bölümde oluşturulan modellerin, söz konusu program kullanılarak yapılan analizleri sonucunda ulaşılan bulgular ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

4.1. Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Modelleme

Çalışmanın bu bölümünde İzmir Metrosu Göztepe İstasyonu civarında fay zonunun geçtiği çalışma alanında yer alan zemin tipleri de göz önüne alınarak fay zonu – NATM tünel birlikteliğinin radye temel performansına etkisi üç boyutlu (3B) sonlu elemanlar (SE) yöntemiyle incelenmiştir. Bu tezde model oluşturulurken Algın vd. (2017) ait çalışmada sunulan görüntü işleme metodu kullanılmıştır. Aynı zamanda

oluşturulan modellemenin gerçeği yansıtması anlamında tünelin geçeceği güzergah üzerindeki ilave yükler dikkate alınmıştır.

Sığ tünel koşullarının etkili olması ve tünelin, şehir içerisinde yer alan yapıların belirlenen kotta altından geçeceği düşünüldüğünden sürsaj yükünün de tasarım sırasında tatbik edilmesi gereklidir. Bu yük değeri zemin üstünde yer alan yapılardan kaynaklanan yük değeri olarak çalışmada kullanılmıştır. Çalışmada, tünel inşaatının gerçekleştirildiği güzergahta yer alan yapıların tahmini olarak 20-25 yıl önce inşa edilmiş olmaları, genel olarak 7 ile 9 arasında kat sayısına sahip olmaları ve bir çok yapının inşa edilirken hangi temel tipi kullanılarak inşa edildiği belirlenemediğinden ötürü sürsaj yükü 0.015 MPa olarak kabul edilmiştir.

Sistem modellenirken başlangıç olarak materyal özellikleri Kun' un (2010) çalışmasından düzenlenerek alınmıştır. Oluşturulan modelde zeminin genişliği 40 m, uzunluğu 40 m ve derinliği 45 m olacak şekilde tasarlanmış olup radye temelin ise derinliği 0.65 m, genişliği 10 m ve uzunluğu 10 m olarak belirlenmiştir. Radye temele ait malzeme özellikleri Çizelge 4.1.'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Radye temelin malzeme özellikleri (Kun, 2010' dan düzenlenerek)

Materyal	γ_n (kN/m^3)	E (MPa)	ν	c' (MPa)	ϕ' (°)
Radye Temel (LE)	25	33000	0.2	-	-

Modelin oluşturulma sürecinde çalışmanın gerçekleştirildiği alana ait zemin tiplerininin γ_n (yoğunluk), ϕ' (içsel sürtüneme açısı), E (elastisite modülü), ν (poisson oranı) ve c' (kohezyon) değerleri Kun' un (2010) yapmış olduğu çalışmadan hareketle düzenlenerek Çizelge 4.2.' de sunulmuştur.

Çizelge 4.2. Çalışma alanında yer alan zeminlerin özellikleri (Kun, 2010' dan düzenlenerek)

Materyal	γ_n (kN/m^3)	E (MPa)	ν	c' (MPa)	ϕ' (°)
Andezit (MC)	21	64500	0.3	0.3	42
Alüvyon Dolgu (MC)	13	115	0.36	0.065	17

Kiltaşı (MC)	18	580	0.35	0.18	18

Ayrıca modelde kullanılmak üzere gerekli olan diğer materyallerin özelliklerine Kun' un (2010) çalışmasında yer alan parametreler alttık oluşturmuştur. Çizelge 4.3.' te bu materyallerin γ_n (yoğunluk), ϕ' (içsel sürtüneme açısı), E (elastisite modülü), ν (poisson oranı) ve c' (efektif kohezyon) değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.3. Çalışma kullanılan diğer materyallerin özellikleri (Kun, 2010' dan düzenlenerek)

Materyal	γ_n (kN/m^3)	E (MPa)	ν	c' (MPa)	ϕ' (^{o})
Püskürtme Beton (LE)	25	33000	0.2	-	-
Ezik Zon (MC)	16	100	0.42	0.062	15
D. Duvar (LE)	25	33000	0.2	-	-
Bulon (LE)	25	20000	0.2	-	-
İksa (LE)	78	215000	0.27	-	-
Beton Bina (LE)	25	43000	0.2	-	-

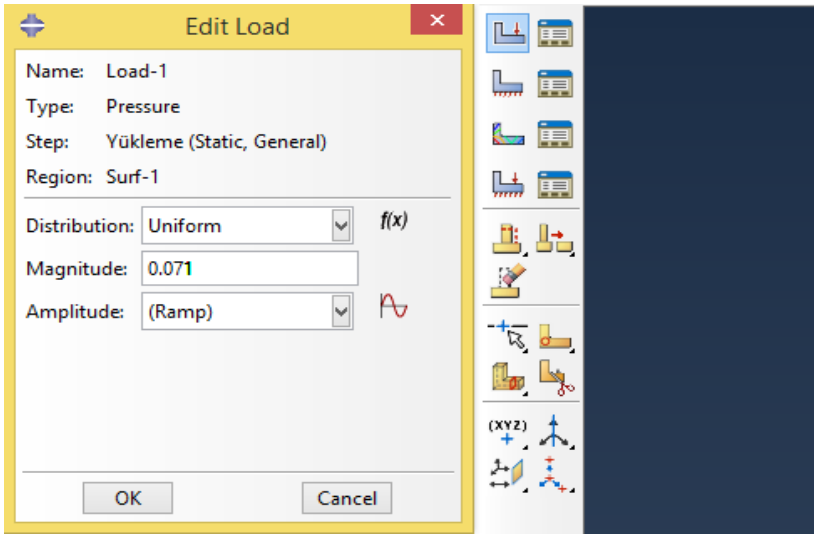
Model oluşturulurken radye temele, zemin tiplerine ve diğer materyallere ait özellikler programa tanımlanmıştır. Abaqus programında radye temel ile zemin arasındaki etkileşim sürtünme katsayısı değeri 0.7 olarak tanımlanmıştır. Tanımlanan 0.7' lik katsayı 28 derece açıya sahip arayüz sürtünme açısına karşılık gelmektedir (Algın, 2016).

Abaqus programında tasarlanan NATM tünelinin çapı 8.69 m olup 40 metrelik bir uzunluk analiz için modellenmiştir. Şekil 4.2.' de tasarlanan NATM tüneli, zemin modeli ve fay zonu görülmektedir.



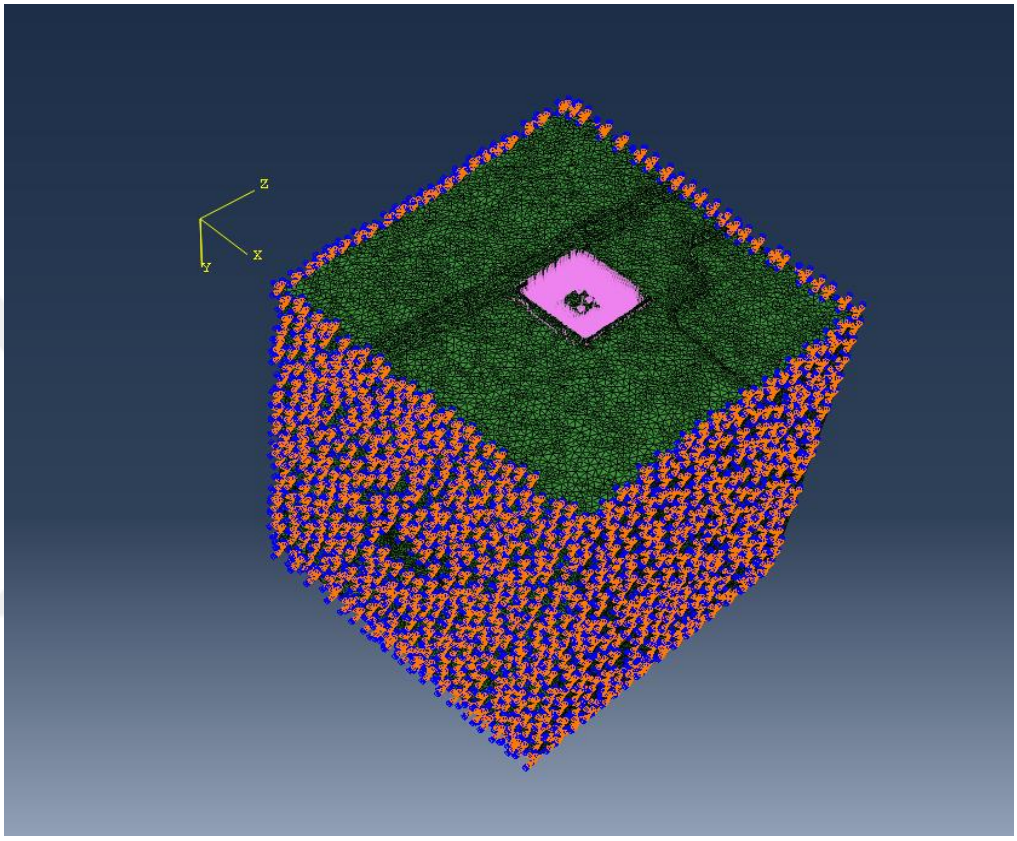
Şekil 4.2. NATM tüneli, zemin modeli ve fay zonunun sonlu elemanlar ağının gösterimi

Şekil 4.3.' te sonlu elemanlar metodu tabanlı programda tünele etki eden 0.071 MPa büyüklüğe sahip yük değerinin tanımlanması sunulmuştur.



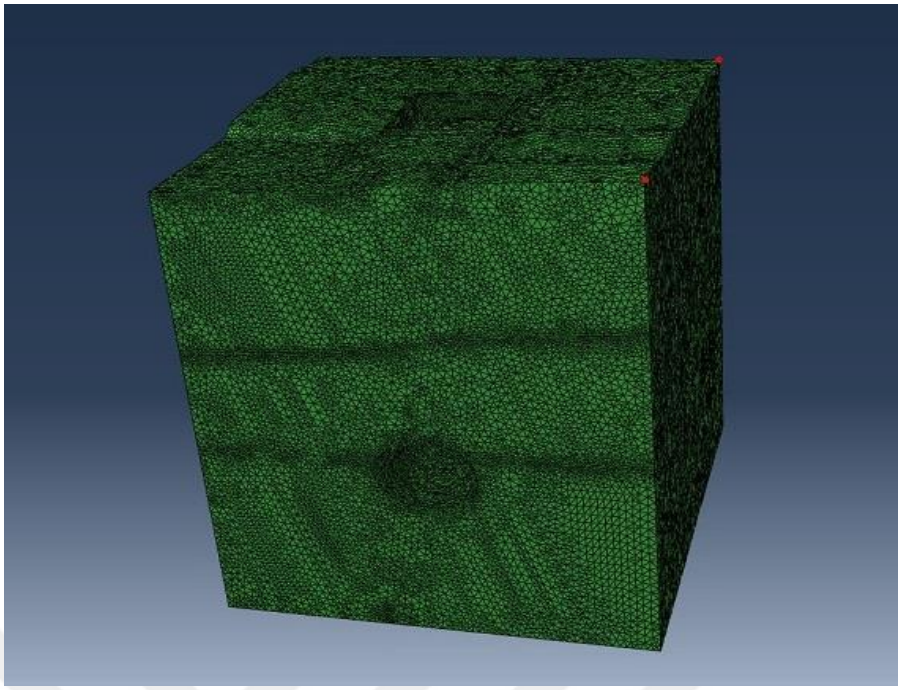
Şekil 4.3. İlgili program üzerinde tünele etki eden yükün tanımlanması

Modelde yük tanımlama işlemi gerçekleştirildikten sonraki aşama da sınır koşulları tayin edilmiştir. Model boyutları yakınsama çalışmaları yapılarak iyileştirilmiştir. Bu bağlamda sınır koşulları modele uygun mesafelere kadar genişletilmiştir. Zeminin en alt kısmı ve dört yan yüzeyi ankastre olarak modellenmiştir. Şekil 4.4.' te sınır koşulları tayin edilmiş zemin modeli görülmektedir.



Şekil 4.4. Sınır koşulları tayin edilmiş zemin modeli

Söz konusu programda sınır şartları oluşturulduktan sonra analiz safhasına geçmeden önce oluşturulan modelin sağlıklı bir şekilde analiz edilebilmesi için son olarak sonlu elemanlara bölme işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.5.' te sonlu elemanlara bölme işlemi gerçekleştirilmiş zemin modeli görülmektedir. Yakınsama çalışması sonucu sonlu eleman sayısı 1.000.000 olarak belirlenmiştir.

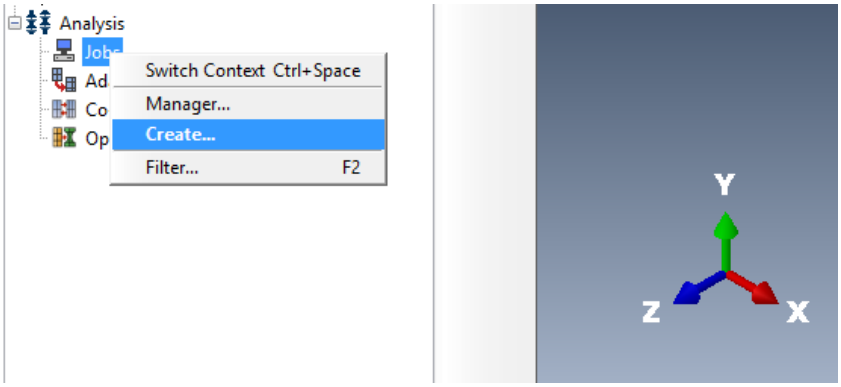


Şekil 4.5. Sonlu elemanlara bölme işlemi tamamlanmış zemin modeli

4.2. Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları ve Yorumlanması

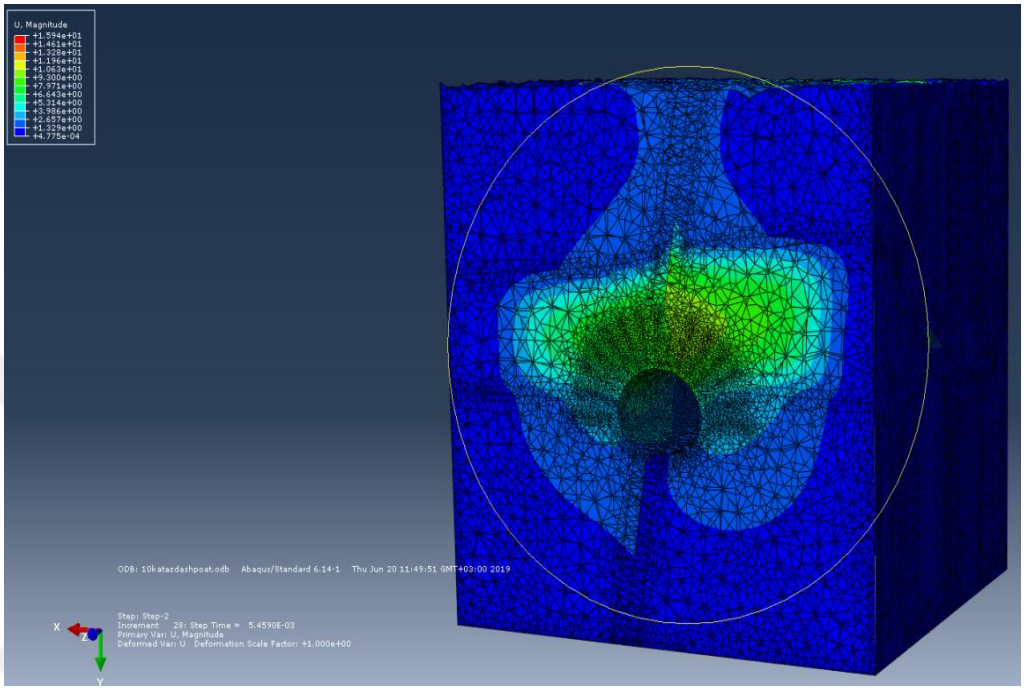
Bir önceki bölümde çalışmanın model ile ilgili (malzeme özelliklerinin tanımlanması, sonlu elemanlar ağının oluşturulması vb.) gerekli bütün işlemler tamamlandıktan sonra bu bölümünde analize yönelik işlemler sunulmuştur.

Analizi başlatmak amacıyla ilk olarak Şekil 4.6.' da görüldüğü gibi 'Jobs' oluşturulmalıdır.



Şekil 4.6. Analizin başlatılması

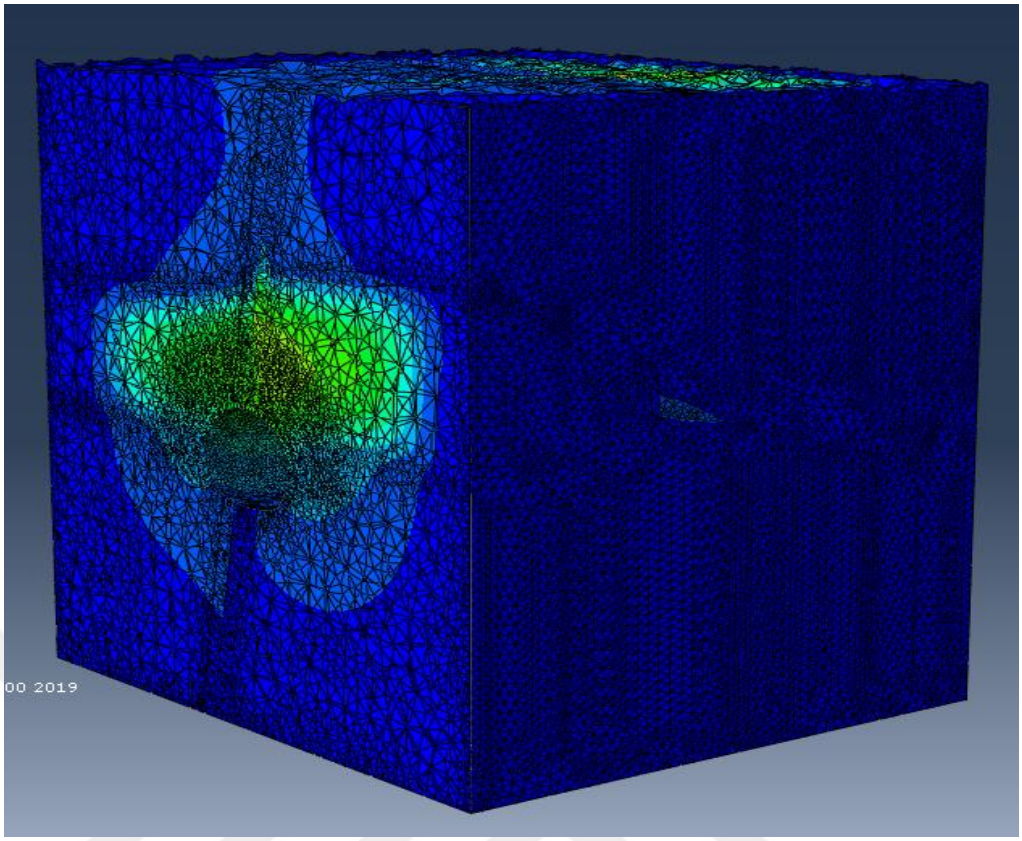
Sonuç ekranı, analiz aşaması tamamlandıktan sonra program ara yüzünde açılmış ve analiz sonuçları irdelenmiştir. Radye temel yüzeyine uygulanan 7100 kN büyüklüğündeki yük değerini karşılayan 0.071 MPa büyüklüğündeki basınç sebebiyle meydana gelen oturmalar Şekil 4.7.' deki gibi elde edilmiştir.



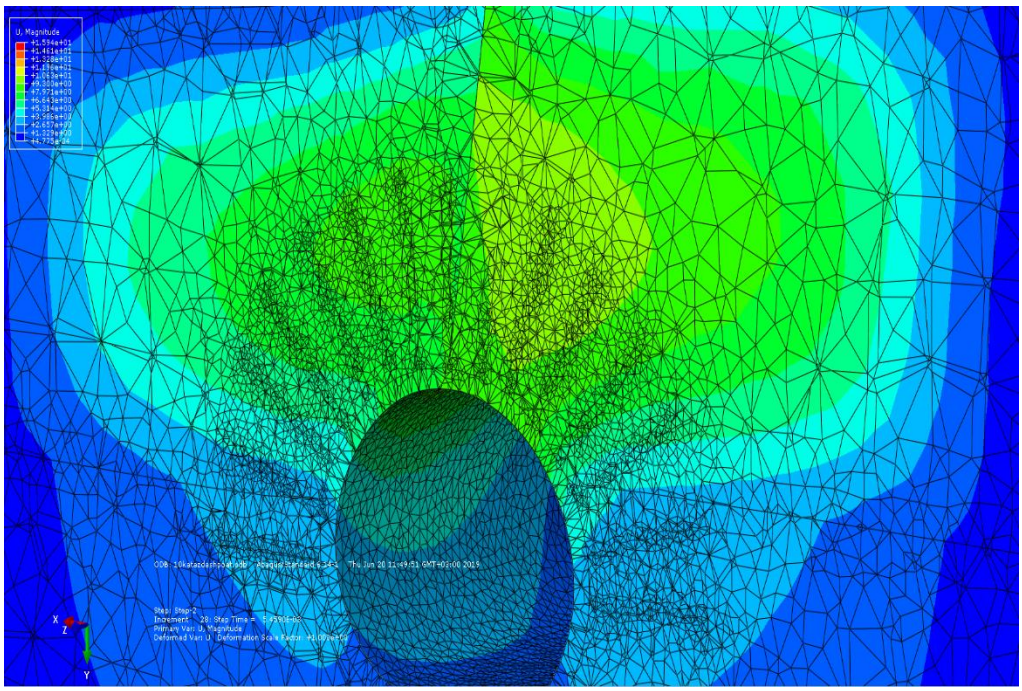
Şekil 4.7. 0.071 MPa basınç değerine karşılık gelen oturmalar

Radye temel yüzeyine uygulanan 7100 kN büyüklüğündeki yük değerini karşılayan 0.071 MPa büyüklüğündeki basınç sebebiyle Şekil 4.7.' de sunulduğu üzere 10.63 mm değerinde oturma meydana gelmiştir. Üç boyutlu (3B) sonlu elemanlar (SE) yöntemi ile elde edilen bu değerin Kun' un (2010) çalışmasında yer alan gerçek oturma değeri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

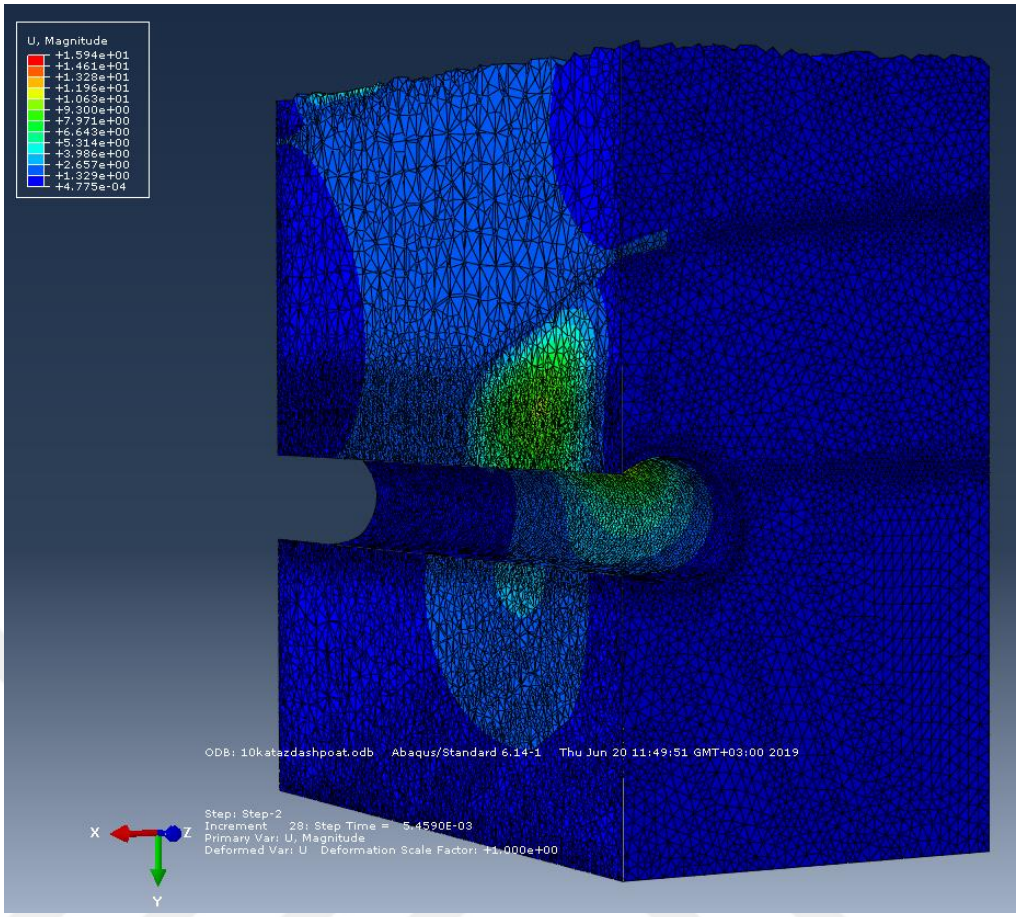
İlgili program ve algoritmalar aracılığıyla gerçekleştirilen 3B SE analiz sonuçlarında zemine ve tünele ait ağ yapıları görülmekte olup tünel kesitinin de yer aldığı görseller Şekil 4.8-4.10' da sunulmuştur.



Şekil 4.8. 3B SE modelinin zemin-radye temel-tünel etkileşimli statik analizi



Şekil 4.9. 3B SE analizinden elde edilen tünel ve çevresinin ağ yapısı



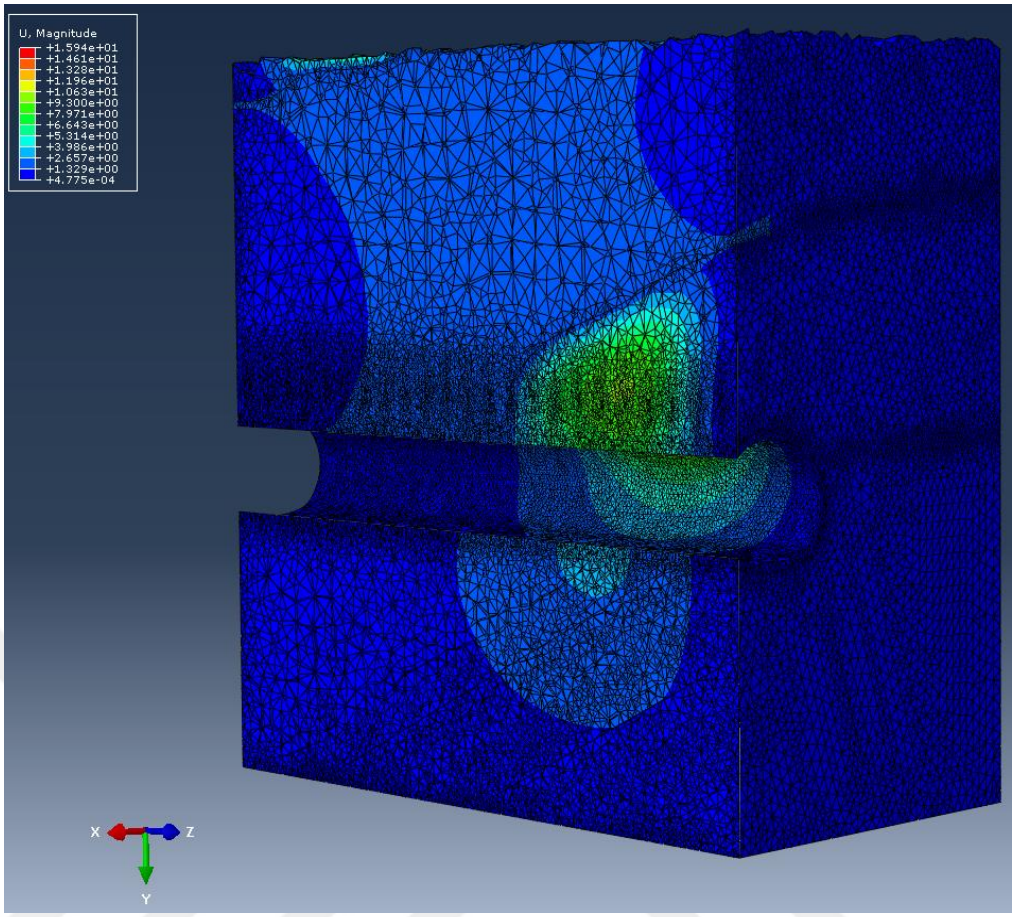
Şekil 4.10. 3B SE analizinden elde edilen tünel kesiti

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Kompleks bir geoteknik mühendisliği sorunu olan fay zonu, NATM tüneli ve radye temel birlikteliği önemli kaynaklar referans gösterilerek üç boyutlu (3B) sonlu elemanlar (SE) yöntemi tabanlı program ve algoritmalar kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmanın gerçekleştirildiği alandaki (İzmir Metrosu Göztepe İstasyonu) materyal özellikleri literatürdeki haliyle seçilmiş, model oluşturulurken NATM tünel açma yöntemi dikkate alınmış ve üst yapıda var olan yükler de hesaba katılarak 3B SE analizi gerçekleştirilmiştir.

3B SE yöntemi ile gerçekleştirilen sayısal analiz, çalışmanın dördüncü bölümünde özetlenen Kun' un (2010) sunmuş olduğu çalışmadaki gerçek arazi verileri ile kıyaslanmıştır. Çalışma kapsamında fay zonu, radye temel ve NATM tünelinden oluşan sistemde, tünel inşaatı çalışması esnasında ve sonrasında kazı kaynaklı oluşabilecek geoteknik problemler ön görülmeye çalışılmıştır. 3B SE yöntemi ile modellenen tünele ait oturmalar Şekil 5.1.' de sunulmuştur.



Şekil 5.1. NATM tünelinde meydana gelen oturmalar

Yakınsama çalışmaları sonucu elde edilen veriler uygun sonlu eleman sayısı kullanmanın önemini göstermiştir. Model gerçeğe yakın ölçülerle tasarlanmış olup analizler çok sayıda sonlu elemanın kullanılmasıyla (1.000.000) detaylı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi (3B SE) ile gerçekleştirilen analiz, tünel kazısı sonucu meydana gelebilecek deformasyonların önceden tespit edilmesini ve bu konuda ek tedbirlerin alınması gerektiğini açıkça işaret etmektedir. Bu nedenle üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi sonucu elde edilen deformasyonların fay zonundan geçen NATM tünelinin ve mevcut yüklerin, radye temel performansında oluşturduğu etkiler dikkatlice incelenmiştir.

Gerçekleştirilen analiz sonucunda oluşan düşey deformasyon (oturma) değeri 10.63 mm olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların Kun' un (2010) çalışmasındaki gerçek ölçüm sonuçlarıyla uyumlu olduğu belirlenmiştir. İzmir Göztepe Metro İstasyonu bölgesindeki fay zonundan geçen ve Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi

kullanılarak açılan tünelin radye temel performansına etkisi üstün modelleme teknikleriyle 3B SE yöntemiyle çözülmüştür. Bu çalışma bu tip karmaşık problemlerin, izlenen modelleme ve analiz tekniği ile başarılı bir şekilde çözülebileceğini göstermiştir.

5.2. Öneriler

Tünel inşaatı sırasında kazı çalışmasına başlanılmadan önce meydana gelebilecek deformasyonların önceden tespit edilmesi projenin ve uygulama güzergâhının seyrine olumlu yönde etki edebilir. Programlar aracılığıyla deformasyon değerlerinin tahmin edilebilmesi farklı projeler için de bu uygulamadan yararlanılabileceği anlamında yeni bakış açıları ortaya koymuştur. Bilgisayar programları aracılığıyla ulaşılan analiz sonuçlarından yola çıkarak tehlikeli durumlara neden olabilecek deformasyonların önceden tespit edilmesi ortaya çıkacak ciddi hasarların önlenmesi konusunda önemli bir noktadır. Analiz sonuçlarına bakıldığında ulaşılan değerler tasarım kriterleri için yeterli değil ise yeniden projelendirme yapılmalıdır. Ancak analiz sonucunda ulaşılan değerler tasarım kriterleri için yeterli ise projelendirme aşaması güvenli ve ekonomik bir şekilde tamamlanarak uygulamaya geçilmelidir.

KAYNAKLAR

ADEMOĞLU, Y., 2008. Modern tünelcilikte jeodezik çalışmaların yönetimi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

AKSOY C. O., ONARGAN T., KUCUK K., GENIS M. ve GUNEY A., 2009. Numerical modeling for the umbrella arch application at the shaft and tunnel intersection. ISRM- Sponsored International Symposium on Rock Mechanics. Rock Characterisation, Modelling and Engineering Design Methods, s.6.

AKSOY C.O. ve ONARGAN T., 2010. The role of umbrella arch and face bolt as deformation preventing support system in preventing building damages. Tunnelling and Underground Space Technology, 25: 553–559.

AKTAŞ, S. Ş., 2009. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi ile inşa edilen bir tünelin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizi ve değerlendirilmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

ALGIN, H. M. ve EKMEN, A. B., 2015. NATM tüneli ile kazıklı köprü temel etkileşiminin üç boyutlu sayısal analizi. 6. Geoteknik Sempozyumu, 26-27 Kasım, Adana, s.1-10.

ALGIN, H. M., 2016. Optimised design of jet-grouted raft using response surface method. Computers And Geotechnics, 74: 56-73.

ALGIN H. M., EKMEN A. B. ve YENMEZ L., 2017. 3D finite elements analysis of barrette piled raft foundations. 7. Geoteknik Sempozyumu, 22-24 Kasım, Istanbul.

ATASOY, A., 2010. İstanbul Metrosu III. aşama tünellerinde kullanılan destekleme tipleri ve maliyetlerinin incelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

ALGIN, H. M., EKMEN, A. B., YENMEZ L. ve GÜMÜŞ V., 2017. Jet grout kazı destekli Aescher (Zürih, İsviçre) Kanopi Tünelinin üç boyutlu deformasyon analizi. 7. Geoteknik Sempozyumu, 22-24 Kasım, İstanbul, s.1-10.

Bell, F.G., 1994. Engineering in rock mass. Great Britain, Butterworths.

CİNGÖZ, A. C., 2013. NATM ve TBM yöntemlerinin deneysel olarak maliyet ve süre kriterleriyle karşılaştırılması. Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

COULTER, S. ve MARTIN, C. D., 2005. Effect of jet-grouting on surface settlements above the Aeschertunnel, Switzerland. Tunnelling and Underground Space Technology, 21: 542-553.

ÇEÇEN, Ö., 2007. İstanbul Metrosu Koska Tünelleri yüzey deformasyon analizi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

DENEK, H., 2003. İstanbul Metrosu Tünellerinde uygulanan Klasik Yeni Avusturya ve boru kemer yöntemlerinin tünel içi ve yüzey deformasyon sonuçlarına göre karşılaştırılması. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, İstanbul.

DUFFAUT, P., 1996a. Creuser et soutenier, servitudes et certitudes des travaux souterrains. Travaux, 270: 9-16.

DUFFAUT, P., 1996b. About some erroneous concepts in rock tunnelling. Gallerie, 48: 16-22.

ERGUVANLI, K., 1984. Mühendislik Jeolojisi Ders Konuları ve Uygulamaları. İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul.

KARAKUŞ, M. ve FOWEL, R. J., 2004. An insight into the New Auastrian Tunnelling Method. (Kayamek'2004) – VII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, Sivas.

KARAOĞLAN, H., 2002. Kaya zeminde tünel tasarımı. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

KUCUK K., GENIS M., ONARGAN T., AKSOY C. O., GUNEY A. ve ALTINDAĞ R., 2009. Chemical injection to prevent building damage induced by ground water drainage from shallow tunnels. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 46: 1136-1143.

KUN, M., 2010. Zayıf kayalarda ve faylı zonlarda tünel açma tasarım ve yapım gereksinmelerinin araştırılması ve çözümlenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.

KUN M. ve ONARGAN T., 2013. Influence of the fault zone in shallow tunneling. A case study of İzmir Metro Tunnel, Tunnelling and Underground Space Technology, 33: 34-45.

KÖSE, H., GÜRGEN, S., ONARGAN, T., YENİCE, H., AKSOY, C. O., 2007. Tünel ve kuyu açma. İzmir Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları, No. 145, İzmir.

LECA, E. ve CLOUGH, G.W., 1992. Preliminary design for NATM tunnel support in soil. Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 118 (4): 558-575.

LUNARDI, P., 2000. Design and construction tunnels-ADESCO-RS approach, Tunnels and Tunnelling International Special Supplement. http://www.rocksoil.com/.

LUNARDI, P., 2008. Design and construction of tunnels. Springer Publications, Milano.

ONARGAN, T., AKSOY, C. O., GÜNGÖR, T., KÜÇÜK, K., KUN, M., 2006. İzmir Metrosu Göztepe – F.Altay istasyonları arası delme tünel kazı ortamı ve tahkimat sistemi değerlendirme etüdü. Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Döner Sermaye Projesi, İzmir.

OSMANOĞLU, D., 2007. Tünellerde zemin iyileştirilmesi ve stabilitenin sonlu elemanlar yöntemi ile Plaxis programında analiz edilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

ÖZTÜRK, O., 2013. Metro tünellerinin açılması sırasında oluşan düşey etkilerin incelenmesi. 2. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu (ISERSE'13), 9-11 Ekim, Karabük, s.1-8.

ÖZTÜRK, Z. ve DÜNDAR M. T., 2013. Metro sistemlerinde yapım ve işletme maliyetlerinin optimizasyonu için bir yaklaşım. 2. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu (ISERSE'13), 9-11 Ekim, Karabük, s.1-7.

PANET, M., 1995. Le calcul des tunnels par la methode convergence-confinemen. Presses des Ponts et Chaussees, Paris.

POLAT, D., 2010. NATM metodu kullanılarak tünel tasarımı ve modellenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

RABCEWICZ, L., 1964. The New Austrian Tunneling Method. Water Power, s.19-24, s. 453-457.

SATICI, Ö. ve TOPAL, T., 2015. Tünel açma yöntemlerinin mühendislik jeolojisi ve kaya sınıflama sistemleri ile değerlendirilmesi. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, Ankara, s.45-57.

SELMAN, H. G., 2014. Tünel kazısı sebebiyle meydana gelen zemin oturmaları ve mevcut yapılara olan etkilerinin incelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

ŞEKER, Ö., 2008. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi prensiplerine göre tünel kaplama tasarımı. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

TERZAGHI, K. ve PECK, B. R., 1948. Soil Mechanics in Engineering Practice. NY: John Wiley and Sons Inc.

TORUNOĞLU, O., 2008. İzmir Metrosu II. etap projesi detay incelemesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Bitirme Projesi.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Muhammed Şerif YOLUK

Uyruğu : T.C.

Doğum Yeri ve Tarihi : Eyyübiye / Şanlıurfa 24.03.1995

Telefon : 05524079544

e-mail : msyoluk95@gmail.com

EĞİTİM

Derece		Adı	İlçe/İl	Bitirme Yılı
Lise	:	Şanlıurfa ÇEAŞ Anadolu Lisesi	Haliliye/Şanlıurfa	2013
Üniversite	:	Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü	Haliliye/Şanlıurfa	2017
Yüksek Lisans	:	Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	Haliliye/Şanlıurfa	2020

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2017	Hübak	Uzman Yardımcısı
2017 -	Şanlıurfa Büyükşehir Belediyesi	İnşaat Mühendisi

UZMANLIK ALANI

Geoteknik

YABANCI DİLLER

İngilizce (Yökdil:46.25)

PROJELER

HÜBAK PROJE NO: 19106