

**YERİNDE GERİLME KOŞULLARI VE İKİZ TÜNEL ARASI
UZAKLIĞIN TÜNEL ÇEVRESİNDE MEYDANA GELEN
DEFORMASYONLARA ETKİSİ**

**EFFECTS OF IN-SITU STRESS CONDITIONS AND THE
DISTANCE BETWEEN TWIN TUNNEL ON TUNNEL
SURROUNDING DEFORMATIONS**

ONUR ÖZDEMİR

Prof. Dr. Harun SÖNMEZ

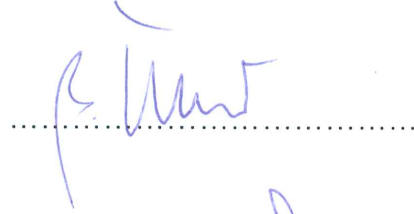
Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

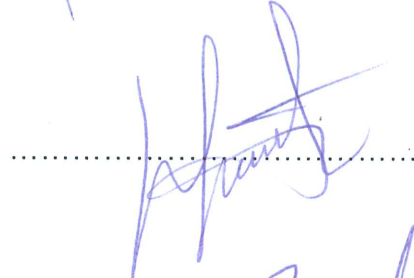
2018

ONUR ÖZDEMİR'in hazırladığı "Yerinde Gerilme Koşulları ve İkiz Tünel Arası Uzaklığın Tünel Çevresinde Meydana Gelen Deformasyonlara Etkisi" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

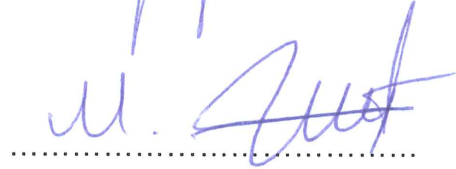
Prof. Dr. Bahtiyar ÜNVER
Başkan



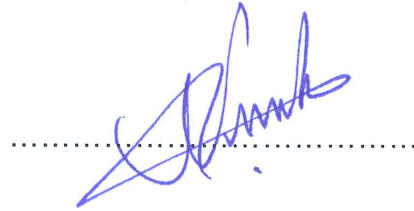
Prof. Dr. Harun SÖNMEZ
Danışman



Prof. Dr. Murat ERCANOĞLU
Üye



Prof. Dr. Nihat Sinan IŞIK
Üye



Prof. Dr. Yılmaz ÖZÇELİK
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin / raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “ Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- o Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir. ⁽¹⁾
- o Enstitü / Fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren Ay ertelenmiştir. ⁽²⁾
- o Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir. ⁽³⁾

3 / 10 / 2018



Onur ÖZDEMİR

“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”

- (1) Madde 6. 1. Lisansüstü teze ilgili patent başvurusu yapılması veya patent alma sürecinin devam etmesi durumunda, tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir
- (2) Madde 6. 2. Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internetten paylaşılması durumunda 3. Şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkanı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü ve fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile altı ayı aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.
- (3) Madde 7. 1. Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, tezin yapıldığı kurum tarafından verilir*. Kurum ve kuruluşlarla yapılan işbirliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlere ilişkin gizlilik kararı ise, ilgili kurum ve kuruluşun önerisi ile enstitü veya fakültenin uygun görüşü üzerine üniversite yönetim kurulu tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir.
Madde 7. 2. Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir, gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir.

* Tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu tarafından karar verilir.

Canım Anneme...

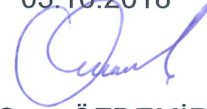
ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

03.10.2018



Onur ÖZDEMİR

ÖZET

YERİNDE GERİLME KOŞULLARI VE İKİZ TÜNEL ARASI UZAKLIĞIN TÜNEL ÇEVRESİNDE MEYDANA GELEN DEFORMASYONLARA ETKİSİ

ONUR ÖZDEMİR

Yüksek Lisans, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Harun SÖNMEZ

Eylül 2018, 64 sayfa

Şehirleşmenin doğal bir sonucu olarak, artan araç sayısı ve günden güne daha fazla önem kazanan zaman yönetimi, ulaşım ağlarının geliştirilmesi ve standartlarının artırılmasını kaçınılmaz hale getirmektedir. Sarp arazi koşullarının olduğu bölgelerde yüksek standartlara sahip karayolu imalatlarının yapılması için zaman zaman tünel inşaatlarına gereksinim duyulmaktadır. Ayrıca tünellerin son yıllarda gelişen teknoloji ile yapılabilirliği ve imalat hızları son derece artmış olup, bu nedenle günümüzde inşa edilen tüneller yüksek yarma kesimlerinin de yerini alarak uygulama projelerinde alternatif oluşturmaktadır.

Bu tez çalışmasında, yerinde gerilme koşullarının ve ikiz tüneller arasındaki uzaklığın deformasyonlara olan olası etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Phase2 programı kullanılarak oluşturulan sayısal modeller üzerinde, yatay gerilmenin düşey gerilmeye olan oranının (k parametresi) olası gerçekçi sınır değerler içerisindeki değişiminin ve ayrıca ikiz tüneller arasındaki uzaklık değişiminin, deformasyon ve plastik bölge analiz sonuçlarına olan etkisi örnek bir en kesit kullanılarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İkiz Tünel, Sayısal Model, Yerinde Gerilme

ABSTRACT

EFFECTS OF IN-SITU STRESS CONDITIONS AND THE DISTANCE BETWEEN TWIN TUNNEL ON TUNNEL SURROUNDING DEFORMATIONS

ONUR ÖZDEMİR

Master of Science, Department of Geology Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Harun SÖNMEZ

September 2018, 64 pages

As a natural consequence of urbanization, increasing number of vehicles and time management gains more importance from day to day, increasing the standards becomes inevitable. Sometimes tunnel constructions are needed for the construction of roads with high standards in the areas with rugged land conditions. In addition, the feasibility and construction time of the tunnels with the developing technology in recent years has increased considerably. Therefore, the tunnels constructed in the application projects today are used as an alternative by replacing the high splitting sections.

In this thesis, it is aimed to evaluate the possible effects of in-situ stress conditions and distance between twin tunnels to deformations. The effects on deformation and plastic zone analysis results was evaluated depending on the change of the ratio of horizontal stress to vertical stress (k parameter) within the possible realistic limit values and also the change of distance between twin tunnels by numerical models generated by using the Phase2 program.

Keywords: Twin tunnel, Numerical Modelling, In-Situ Stress

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım sırasında bilgi birikimi, tecrübesi, yardımseverliği ve hoşgörüsüyle tez danışmanım Prof. Dr. Harun SÖNMEZ'e,

Tüm içtenlikleriyle deneyimlerini ve yardımlarını esirgemeyen jüri üyeleri; Prof. Dr. Bahtiyar Ünver'e, Prof. Dr. N. Sinan Işık'a, Prof. Dr. Murat Ercanoğlu'na ve Prof. Dr. Yılmaz Özçelik'e,

T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanı Sayın Sina Kızıroğlu'na ve diğer tüm başkanlık personeline,

Her koşulda yanımda olan ve beni hiç yalnız bırakmayan eşim Irmak Meltem ÖZDEMİR'e,

Hayat tecrübeme verdiği katkıyı hiçbir koşulda ödeyemeyeceğim ve ömür boyu gölgesinde olacağım babam Erol Ergün ÖZDEMİR'e,

Her türlü araştırma ve tez çalışmalarım sırasında hiçbir desteğini benden esirgemeyen KOBİ Mühendislik Müşavirlik Ltd. Şti. çalışma arkadaşlarıma ve işverenlerime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ÇİZELGELER	v
ŞEKİLLER	vi
SİMGELER VE KISATLIMLAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı	1
2. TEZ KONUSUNA YÖNELİK LİTERATÜR DEĞERLENDİRMESİ	2
2.1. Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemleri	2
2.1.1. RMR Sınıflama Sistemi	4
2.1.2. Q (NGI) Sınıflama Sistemi	7
2.1.3. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)	8
2.2. Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi (NATM)	10
2.3. Yerindeki (Arazideki) Gerilme Koşulları	14
2.4. Sayısal Modellemeler	16
3. SAYISAL MODELLEME GİRDİ PARAMETRELERİ	17
3.1. Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemlerine Göre Yapılan Değerlendirmeler	17
3.2. Dayanım ve Deformasyon Parametreleri	21
4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE TÜNEL DEFORMASYON ANALİZLERİ	26
4.1. Sayısal Modelleme ve Analizleri	32
4.1.1. “k” değerindeki değişimin etkisine yönelik analizler	49
4.1.2. İkiz tünel arasındaki mesafenin etkisine yönelik analizler	53
4.2. Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçlarına İlişkin Değerlendirmeler	55
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	59

ÇİZELGELER

	Sayf no.
Çizelge 2.1. Başlıca kaya kütlesi sınıflama sistemleri (Bieniawski [9] ve Özkan ve Ünal [5]'den yararlanılmıştır)	3
Çizelge 2.2. Bieniawski [9] tarafından önerildiği şekliyle RMR sınıflama sistemi (Ulusay ve Sönmez [18]'den alınmıştır.)	5
Çizelge 2.3. NATM (ONORM 2203) sınıflaması kazı ve destek sınıfları [31]	12
Çizelge 3.1. Jeomekanik parametreler ve RMR puanı [34].....	17
Çizelge 3.2. Q (NGI) sınıflaması [34]	18
Çizelge 3.3. Tünel bölgesini çevreleyen kaya kütleleri için GSI değerlendirilmesi	21
Çizelge 3.4. Kaya malzemesi türlerine göre Hoek [37] tarafından en son önerilmiş m_i sabiti değerleri ve analizlerde kullanılacak parametreler	22
Çizelge 3.5. Jeomekanik deney verileri (Öner [34]'den)	23
Çizelge 3.6. Kaya kütlelerinin deformasyon modülünün belirlenmesi için önerilen bazı eşitlikler ve kalkışta kaya kütlesi için hesaplanan E_m değerleri.....	24
Çizelge 4.1. Farklı "k" parametrelerine göre tünelin farklı bölgelerindeki deformasyon miktarları	57
Çizelge 4.2. İkiz tünel arasındaki uzaklık değişiminin deformasyon ile ilişkisi	58

ŞEKİLLER

Sayf no.

Şekil 2.1. Biniawski [8] tarafından geliştirilen RMR puanı ve tünel açıklığına bağlı olarak desteksiz durma süresini belirleme abağı (Ulusay ve Sönmez [18]'den alınmıştır).	6
Şekil 2.2. Q sistemine göre destek seçimi abağı [22]	8
Şekil 2.3. GSI sınıflama abağının son şekli [26]	9
Şekil 2.4. Sönmez ve Ulusay [29] tarafından önerilen sayısal GSI abağı	10
Şekil 2.5. Derinliğe bağlı olarak gelişen “k” parametresi ilişkileri [1].....	15
Şekil 3.1. Gökçebelen tüneli Km: 70+155 enkesiti [34].....	18
Şekil 3.2. Q – RMR – ÖNORM kaya sınıfları ilişkisi [35].....	19
Şekil 3.3. Sönmez ve Ulusay [29] tarafından önerilen GSI sınıflama sistemi abağında kalkışt ve kireçtaşı kaya kütlesi değerlendirmesi	20
Şekil 4.1. İlerleyen bir tünel kazısı etrafındaki deformasyon paterni [44]	27
Şekil 4.2. Destek öncesi deformasyonun belirlenmesi [44].....	29
Şekil 4.3. Tünel imalat aşamaları için uygulanacak analiz aşamaları.....	31
Şekil 4.4. Tez kapsamında izlenen sayısal modelleme akım şeması	32
Şekil 4.5. Tünel çekirdek kazı bölgelerinde kullanılacak indirgenmiş (material softening) kaya kütlesinin deformasyon modülünün belirlenmesinde izlenen adımlar	33
Şekil 4.6. Analizi yapılan kesitin tünel aynasına olan uzaklığı	34
Şekil 4.7. Seçilen en kesit için oluşturulan sonlu elemanlar analiz modeli	34
Şekil 4.8. Desteksiz analizde deformasyon dağılımı ve kullanılan tasarım parametreleri (k=0.25).....	35
Şekil 4.9. Desteksiz analizde plastik bölge dağılımı ve ortalama yarıçapın belirmemesi (k=0.25)	36
Şekil 4.10. Çekirdekte kademeli olarak azaltılan E_m değerleri için analiz modeli ve aşamalar	37
Şekil 4.11. E_m değerinin 6 GPa olduğu aşamadaki deformasyon değeri (k=0.25)	37
Şekil 4.12. Kademeli olarak azaltılan E_m değerlerine karşılık gelen deformasyonlar (k=0.25)	38
Şekil 4.13. Kapanma / maksimum kapanma ile E_m arasındaki ilişki (k=0.25).....	38
Şekil 4.14. Vlachopoulos ve Diederichs'in [44] abağı üzerinde destek deformasyonunun belirlenmesi (k=0.25)	39
Şekil 4.15. Kapanma / maksimum kapanma ile E_m arasındaki ilişki (k=0.25).....	40
Şekil 4.16. E_m değerinin 6 GPa olduğu aşamadaki deformasyon değeri (k=0.50)	41

Şekil 4.17. Desteksiz analizde plastik bölge dağılımı ve ortalama yarıçapın belirlenmesi ($k=0.50$)	42
Şekil 4.18. E_m değerinin 6 GPa olduğu aşamadaki deformasyon değeri ($k=0.50$)	43
Şekil 4.19. Kademeli olarak azaltılan E_m değerlerine karşılık gelen deformasyonlar ($k=0.50$)	43
Şekil 4.20. Kapanma / maksimum kapanma ile E_m arasındaki ilişki ($k=0.50$).....	44
Şekil 4.21. Vlachopoulos ve Diederichs'in [44] abağı üzerinde destek deformasyonunun belirlenmesi ($k=0.50$)	44
Şekil 4.22. Kapanma / maksimum kapanma ile E_m arasındaki ilişki ($k=0.50$).....	45
Şekil 4.23. E_m değerinin 6 GPa olduğu aşamadaki deformasyon değeri ($k=0.75$)	46
Şekil 4.24. Desteksiz analizde plastik bölge dağılımı ve ortalama yarıçapın belirlenmesi ($k=0.75$).....	46
Şekil 4.25. E_m değerinin 6 GPa olduğu aşamadaki deformasyon değeri ($k=0.75$)	47
Şekil 4.26. Kademeli olarak azaltılan E_m değerlerine karşılık gelen deformasyonlar ($k=0.75$)	47
Şekil 4.27. Kapanma / maksimum kapanma ile E_m arasındaki ilişki ($k=0.75$).....	48
Şekil 4.28. Vlachopoulos ve Diederichs'in [44] abağı üzerinde destek deformasyonunun belirlenmesi ($k=0.75$)	48
Şekil 4.29. Kapanma / maksimum kapanma ile E_m arasındaki ilişki ($k=0.75$).....	49
Şekil 4.30. Sayısal modeli ve kullanılan tasarım parametreleri	50
Şekil 4.31. $k=0.25$ için destek sonu toplam deformasyon miktarları.....	50
Şekil 4.32. $k=0.25$ için plastik bölge analizi	51
Şekil 4.33. $k=0.50$ için destek sonu toplam deformasyon miktarları.....	51
Şekil 4.34. $k=0.50$ için plastik bölge analizi	51
Şekil 4.35. $k=0.75$ için destek sonu toplam deformasyon miktarları.....	52
Şekil 4.36. $k=0.75$ için plastik bölge analizi	52
Şekil 4.37. $L=12.0$ m kesiti için destek sonu toplam deformasyon dağılımı	53
Şekil 4.38. $L=12.0$ m kesiti için plastik bölge dağılımı.....	53
Şekil 4.39. $L=18.0$ m kesiti için destek sonu toplam deformasyon miktarları	54
Şekil 4.40. $L=18.0$ m kesiti için plastik bölge analizi	54
Şekil 4.41. $L=24.0$ m kesiti için destek sonu toplam deformasyon miktarları	54
Şekil 4.42. $L=24.0$ m kesiti için plastik bölge analizi	55
Şekil 4.43. İkiz tüneldeki deformasyon değerlendirme bölgeleri	56

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

D	Örselenme faktörü
E_i	Elastisite modülü
E_m	Kaya kütlelerinin deformasyon modülü
J_a	Eklem alterasyon sayısı
J_n	Eklem takımı sayısı
J_r	Eklem pürüzlülük sayısı
J_w	Eklem su azaltma faktörü
k	Yatay yükün düşey yüke oranı
m_i, m_b, s, a	Hoek-Brown malzeme sabitleri
$I_{s(50)}$	Nokta yükü indeksi
SR	Yapısal özellik puanı
SCR	Süreksizlik yüzey koşulu puanı
SRF	Gerilme azaltma faktörü
R_r	Pürüzlülük puanı
R_w	Bozunma puanı
R_f	Dolgu puanı
RQD	Kaya Kalite Göstergesi (Belirteci)
Q	Kaya Kütle Kalitesi Yöntemi
γ_n	Doğal birim hacim kütle
q_u	Tek eksenli basınç dayanımı
σ_1	En büyük etkin asal gerilme
σ_3	En küçük etkin asal gerilme
ν	Poisson oranı

Kısaltmalar

GSI	Jeolojik Dayanım İndeksi
NATM	Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi
NGI	Norveç Jeoteknik Enstitüsü
ÖNORM	Avusturya Standartlar Kurumu

ISRM	Uluslararası Kaya Mekaniği Topluluđu (International Society for Rock Mechanics)
RMR	Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemi
RSR	Kaya Yapısı Değeri

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı

Yeni karayollarının yapılmasının yanı sıra mevcut karayolu ağlarının yatay ve düşey geometride iyileştirilmesi için genelde tünel, köprü ve viyadük gibi büyük sanat yapılarının imalatı gerekmektedir. Bu yapılardan tüneller, karayolu standartlarının gelişmesi ve altyapı elemanlarının yerin altına alınması için özellikle engebeli topoğrafyaya sahip bölgelerde önemli rol oynamaktadır.

Tünellerin güvenli ve ekonomik bir şekilde tasarımının yapılması ve kazı aşamalarının gerçekçi bir biçimde modellenmesi için bazı jeolojik parametrelerinin yanı sıra yer altı açıklığının bulunduğu derinliklerdeki yerindeki gerilmelerin de gerçekçi bir şekilde öngörülmesi gerekmektedir. Kazı öncesindeki koşullar altında tünel imalatının yapılacağı derinliklerdeki gerilme koşulları, örtü yükü ve tektonik rejim gibi faktörlerle birlikte denge durumundadır. Tünel imalatı sırasında ise bu durum bozularak, imalat sonrasında değişen yerinde gerilme koşullarının kabul edilebilir deformasyon miktarları içinde yeniden denge durumuna gelmesi hedeflenir. Tünel imalatına bağlı olarak yapılan deformasyon analizlerinin gerçekçi olması için, ortama ait temsil edici jeoteknik tasarım parametrelerinin yanı sıra yer altı açıklığının inşa edileceği derinlikteki yatay ve düşey gerilmelerin de sağlıklı bir şekilde ön görülmesi gerekmektedir. Bu amaçla yerinde uygulanabilecek bazı zor ve pahalı deneysel yaklaşımların yanı sıra, uygulama pratiği yönüyle dikkate alındığında Sheorey [1] tarafından önerilen doğrusal olmayan eşitlik kullanılarak yatay gerilmenin düşey gerilmeye oranı olan “k” parametresinin değişimi derinliğe bağlı bir şekilde öngörülebilmektedir.

Tez çalışması kapsamında, Karayolları 13. Bölge Müdürlüğü idaresinde yer alan “Gazipaşa - 5. Bölge Hududu Yolu Etüt ve Proje Danışmanlık Hizmet Alımı İşi” bünyesinde projelendirilen Gökçebelen Tüneli’ne ait örnek bir ikiz tünel kesiti ve diğer gerekli girdi parametreleri kullanılarak, yerinde gerilme koşullarındaki olası değişim aralığı Sheorey [1] tarafından yaklaşımla belirlenmiş ve deformasyon analizlerinde kullanılmıştır. Ayrıca, sayısal modellemesi Phase2 (<https://www.rocscience.com>) programı ile yapılan bu kesitteki ikiz tünel arasındaki mesafe de değiştirilerek sayısal analizler tekrarlanmış ve deformasyon gelişimi tekrar değerlendirilmiştir.

2. TEZ KONUSUNA YÖNELİK LİTERATÜR DEĞERLENDİRMESİ

Tez çalışması kapsamında yapılması öngörülen değerlendirmelere de altlık oluşturması amacıyla, tünel uygulamaları açısından tezin konusuyla ilgili olabilecek bazı genel bilgiler bu bölümde özet olarak sunulmuştur.

2.1. Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemleri

Doğadaki kaya kütlelerindeki çeşitliği benzer davranış grupları altında gruplamayı amaçlayan kaya kütlesi sınıflama sistemleri, derin şevler, baraj inşaatı ve özellikle de tünel gibi yer altı açıklıklarının projelendirilmelerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu sınıflama sistemleri, özellikle tasarım aşamasında kazı ve destek öngörülerine de önemli düzeyde ışık tutmaktadır. Ayrıca bu sınıflama sistemleri, kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon davranışlarının sayısal tanımlamalara dönüştürülmesinde kullanılan çok sayıdaki görgül yaklaşımda da girdi parametresi olarak da kullanılmaktadırlar.

Sınıflama incelenen nesnelere benzer ya da aynı özelliklerinin bir araya toplanarak gruplandırılması olarak tanımlanabilir. Zaman içerisinde mühendislik uygulamalarındaki artan tecrübeye bağlı olarak, jeolojik – jeoteknik araştırmalar sırasında karşılaşılan birçok farklı özelliğin gruplandırılmasına ihtiyaç duyulmuş ve bunun bir sonucu olarak amaca yönelik olarak çok sayıda kaya kütlesi sınıflama sistemleri geliştirilmiştir. Bu görgül yöntemler uzun yıllardır kaya mühendisliğini esas alan tasarımların önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Ayrıca edinilen deneyimler ve istatistiksel değerlendirmelerle söz konusu yöntemler farklı araştırmacılar tarafından geliştirilmektedir (Goodman [2], Hoek ve Brown [3] ve Bieniawski [4]). Kaya kütlesi sınıflama sistemleri ön tasarım aşaması için önemli bilgiler vermekte ve bu kapsamda yol göstermektedir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde, kaya kütlesi sınıflama sistemlerinin teknik olarak doğru kullanılması halinde, birçok mühendislik yapısının tasarımı için önemli bir yapıtaşı olduğu görülmektedir [5].

Araştırma çalışmaları sonucunda belirlenen kaya kütlesi sınıfları birçok tünel projesinde ön tasarım anlamında fikir vermektedir. Bunlardan ilki, Terzaghi [6] tarafından geliştirilen kaya yükü sınıflama sistemidir. Bu sistem uzun yıllardır birçok tünel ve diğer bazı yapıların tasarımında kullanılmıştır. Terzaghi sınıflama

sistemi daha sonraki dönemde Deere vd. [7] tarafından geliştirilmiştir. Terzaghi [5] tarafından önerilen sınıflamada, çelik – bağ tahkimatına karşılık olarak yeni sistemlerde, günümüzde kullanılan kaya saptaması ve püskürtme beton vb. tahkimat önerileri getirilmiştir. Bu yeni sınıflama sistemleri, uygulamada sadece tünelcilikle sınırlı kalmamış, diğer yer altı boşlukları, yer altı ocakları, şevler ve temellerin tasarımı gibi farklı mühendislik uygulamalarında da zaman zaman kullanılmıştır [8]. Literatürde yaygın bir şekilde yer bulan başlıca kaya kütlesi sınıflama sistemleri Çizelge 2.1’de verilmektedir.

Çizelge 2.1. Başlıca kaya kütlesi sınıflama sistemleri (Bieniawski [9] ve Özkan ve Ünal [5]’den yararlanılmıştır)

Sınıflama Sistemi	Kaynak	Ülkesi	Uygulama Alanı
Kaya Yüğü	Terzaghi [6]	A.B.D.	Çelik Destekli Tünel
Tahkimatsız Durma Zamanı	Lauffer [10]	Avusturya	Tünelcilik
NATM (Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi)	Pacher vd. [11]	Avusturya	Tünelcilik
Kaya Kalite Göstergesi (RQD)	Deere ve Miller [12]	A.B.D.	Karot Loglaması, Tünelcilik
Kaya Yapısı Değeri (RSR)	Wickham vd. [13]	A.B.D.	Tünelcilik
Jeomekanik Sınıflama Sistemi veya Kaya Kütlesi Değeri (RMR) Sistemi	Bieniawski [14] (en son modifikasyonu 1989 – A.B.D.)	Güney Afrika ve A.B.D.	Tünelcilik, Madenler
Q Sistemi	Barton vd. [15]	Norveç	Tünelcilik, Madenler, Yer altı Boşlukları
Temel Jeoteknik Sınıflama Sistemi	ISRM [16]	Uluslararası	Genel Amaçlı

Kaya kütlesi sınıflama sistemleri eğer belirli koşullar yerine getirilirse; deneyim, mühendislik yargıları ve ölçüm bilgileri sonucunda elde edilen bilgilerin birleştirilmesiyle, niceliksel (sayısal) olarak kaya kütlesi özelliklerini ve destek gereksinimlerini ön tasarım safhasında belirlemek için kullanılır [17]. Karpuz ve Hindistan [8] kaya kütlesi sınıflama sistemlerinin mühendislik uygulamalarına sağladığı yararları aşağıdaki gibi özetlemiştir.

- i. Belirli bir bölgede bulunan kaya kütlelerini aynı davranışı gösterecek gruplara ayırmak,
- ii. Her bir grubun özelliklerini anlayabilmek için bir temel oluşturmak,
- iii. Tasarım için sayısal veriler sağlamak,

- iv. Kaya mühendisleri arasında iletişimi sağlamak için herkesin kullanabileceği ortak bir temel oluşturmak.

Sınıflama sistemlerinin, yukarıda belirtilen yararları sağlaması için şu özelliklere sahip olması gerekir;

- i. Basit, kolayca hatırlanabilmeli ve anlaşılabilir, anlaşılabilir, anlaşılabilir,
- ii. Kullanılan her terim açık ve mühendislikte kabul edilen bir şekilde anlatılmalıdır,
- iii. En önemli kaya özelliklerini içermelidir,
- iv. Arazide ucuz ve çabuk yapılabilecek deneyler sonucu elde edilebilen ve ölçülebilir verilere dayanmalıdır,
- v. Sınıflama parametrelerinin göreceli önemini tartabilen bir değerlendirme sistemine sahip olmalı ve
- vi. Kaya tahkimat tasarımı için sayısal veri sağlayacak şekilde kullanılabilir.

Kaya mekaniği mühendislik uygulamalarındaki yaygın kullanımları nedeniyle, RMR, Q ve GSI sınıflama sistemlerine aşağıda kısaca değinilmiştir.

2.1.1. RMR Sınıflama Sistemi

Kaya Kütlesi Puanlama (Rock Mass Rating) sistemi önerildiği ilk defa önerildiği 1973'den günümüze artan uygulama sayısı ve bunlara bağlı olarak gerek duyulan düzenlemeler neticesinde birkaç defa modifiye edilmiştir. RMR sınıflama sistemi Bieniawski [9] tarafından sunulduğu şekliyle son şeklini almıştır. RMR sınıflama sisteminin bileşenleri aşağıdaki gibidir.

1. Kaya malzemesinin dayanımı”
2. Kaya kalite göstergesi, RQD
3. Süreksizlik aralığı
4. Süreksizliklerin özellikleri
5. Yeraltı suyu durumu
6. Süreksizlik yönelimi düzeltilmesi

RMR sınıflama sisteminde 5 girdi parametresi için alınan puanların toplamı ise temel RMR puanını oluştururken, süreksizliklerin yönelimi ve tünelin kazı yönüne

bağlı olarak bir düzeltme puanı uygulanarak düzeltilmiş RMR puanı belirlenir. RMR sınıflama sisteminin genel puanlama abağı Çizelge 2.2'de görülmektedir.

Çizelge 2.2. Bieniawski [9] tarafından önerildiği şekliyle RMR sınıflama sistemi (Ulusay ve Sönmez [18]'den alınmıştır.)

A. SINIFLAMA PARAMETRELERİ VE PUANLARI

1*	Kaya malzemesinin dayanımı	Nokta yükü dayanım indeksi	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Düşük aralıklar için tek eksenli dayanım			
		Tek eksenli sıkışma dayanımı	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa	
		Puan	15	12	7	4	2	1	0	
2*	Kaya kalite göstergesi, RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	< 25			
		Puan	20	17	13	8	3			
3*	Süreksizlik aralığı		> 2 m	0.6-2m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm			
		Puan	20	15	10	8	5			
4**	Süreksizlik koşulu		Çok kaba yüzeyler Sürekli değil Ayrılma yok Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzeyler Ayrılma < 1 mm Sert eklem yüzeyleri	Az kaba yüzeyler Ayrılma < 1 mm Yumuşak eklem yüzeyleri	Sürtünme izli yüzeyler veya fay dolgusu < 5 mm veya 1-5 mm açık eklem, sürekli eklem	Yumuşak fay dolgusu > 5 mm kalınlıkta veya açık eklem > 5 mm devamlı süreksizlikler			
		Puan	30	25	20	10	0			
5	Yeraltı-suyu	Tünelin 10m'lik kısmından gelen su	Yok	10 lt/dk	< 25 lt/dk	25-125 lt/dk	> 125 lt/dk			
		Eklemdeki su basıncı	ORANI	0	0.0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5		
		En büyük asal gerilme		T _z Veya _{in} kuru	Veya _i	Veya _k	Veya _{ma}	≤ Veya _ı		
		Genel koşullar		T _z Veya _{in} kuru	Veya _i	Veya _k	Veya _{ma}	≤ Veya _ı		
		Puan	15	10	7	4	0			

* Şekil 4.5'deki grafiklerden tayin edilir.

(1 MPa = 10.197 kgf/cm²)

** Çizelge 4.15'den belirlenir

B. TÜNELDE SÜREKSİZLİK EĞİM ve DOĞRULTUSUNUN ETKİSİ

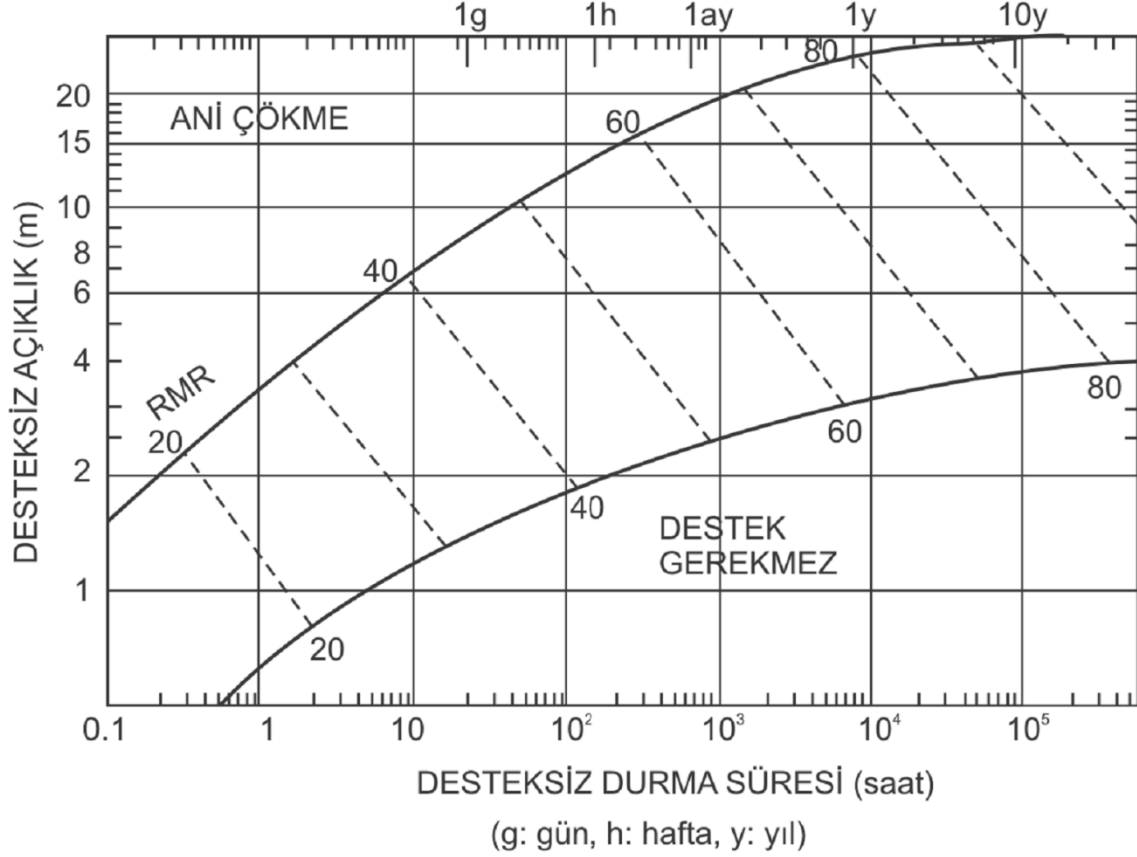
Doğrultu tünel eksenine dik				Doğrultu tünel eksenine paralel		Doğrultuya bakılmaksızın, eğim 0°-20° arasında
Eğim yönünde ilerleme		Eğime karşı yönde ilerleme		Eğim 45°-90°	Eğim 20°-45°	
Eğim 45°-90°	Eğim 20°-45°	Eğim 45°-90°	Eğim 20°-45°	Eğim 45°-90°	Eğim 20°-45°	
Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil	Orta	Orta

C. SÜREKSİZLİK YÖNELİMİNE GÖRE DÜZELTME

Süreksizliklerin doğrultu ve eğimi	Çok uygun	Uygun	Orta	Uygun değil	Hiç uygun değil	
Puan	Tüneller	0	-2	-5	-10	-12
	Temeller	0	-2	-7	-15	-25
	Şevler	0	-5	-25	-50	-60

RMR sınıflama sisteminde, ilk dört girdi parametresi için genel kullanıma yönelik olarak ortalama puanlar Çizelge 2.2'den belirlenebildiği gibi, Bieniawski [9] daha hassas puanlamaya yönelik olarak grafiksel sunumlarda vermiştir. RMR puanı desteksiz durma süresi, destek basıncı, tahkimat seçimi gibi tünelcilik uygulamalarına yönelik kullanımının yanı sıra, kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyonun belirlenmesine yönelik görgül yaklaşımlarda girdi olarak da yaygın bir şekilde kullanılmıştır.

Kaya kütlesinin RMR puanı ve tünel açıklığına bağlı olarak desteksiz kalma süresine ilişkin değerlendirme Şekil 2.1'deki grafiksel sunum ile belirlenebilmektedir.



Şekil 2.1. Bieniawski [8] tarafından geliştirilen RMR puanı ve tünel açıklığına bağlı olarak desteksiz durma süresini belirleme abağı (Ulusay ve Sönmez [18]'den alınmıştır).

Ünal [19] ise RMR puanına bağlı olarak destek basıncının öngörülmesine yönelik olarak aşağıdaki eşitliği önermiştir.

$$P = \left(\frac{100 - RMR}{100} \right) \gamma BS \quad (2)$$

Bu eşitlikte; P: destek basıncı (kN/m²), γ : kayanın birim hacim ağırlığı (kN/m³), B: tünelin genişliği (m) ve S: gerilme faktörü (yatay gerilmenin düşey gerilmeye oranı)'dır.

2.1.2. Q (NGI) Sınıflama Sistemi

Q veya NGI (Norwegian Geotechnical Institute) sistemi olarak isimlendirilen kaya kütlesi sınıflama sistemi, 70'li yılların başlarında Barton vd. [20] tarafından özellikle tünel tasarımı için geliştirilmiştir [18]. Kaya mühendisliğinde tünelcilik kalitesi indeksi olarak değerlendirilen Q değeri, 6 farklı jeomekanik girdi parametresinin bir fonksiyonu olarak aşağıdaki eşitlikten hesaplanmaktadır.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (2.1)$$

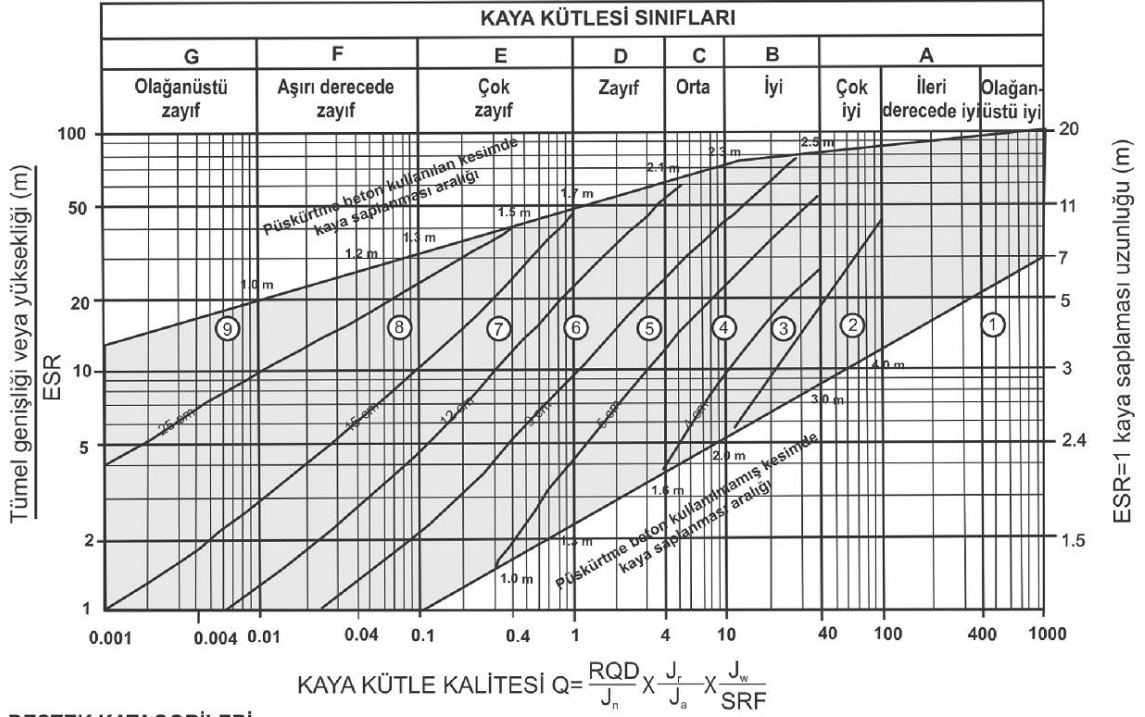
Yukarıdaki eşitlikte; RQD=Kaya kalite göstergesi, J_n : Eklem takımı sayısı, J_r : Eklem pürüzlülük sayısı, J_a : Eklem alterasyon sayısı, J_w : Eklem su azaltma faktörü, SRF: Gerilme azaltma faktörü'dür.

Bu eşitlik'te "RQD/ J_n " kaya kütlesinin bloklanma yapısını ve blok boyutunu " J_r/J_a " dolgulu ve dolgusuz süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülük ve süreksizlik karakteristiklerini, diğer bir ifadeyle makaslama dayanımını ve " J_w/SRF " yerindeki etkin gerilme koşullarını temsil etmektedir.

Q sistemi de RMR sınıflama sisteminde olduğu gibi, destek basıncının ön görülmesinde, tahkimat seçiminde, kaya kütlesinin dayanım ve deformasyon parametrelerinin belirlenmesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. RMR ve Q sistemlerinin benzer çıktılara yönelmesinin de bir sonucu olarak bu iki sistemin puanları arasında görgül ilişkiler araştırılmış olup, Bieniawski [21] tarafından aşağıdaki ilişki önerilmiştir.

$$RMR=9\ln(Q)+44 \quad (2.2)$$

RMR sistemiyle karşılaştırıldığında, Q puanına bağlı olarak daha geniş bir destek sistemi seçilmesine olanak sağlayan grafiksel sunum ise Şekil 2.2'de görülmektedir.



DESTEK KATEGORİLERİ


- | | |
|--|---|
| <p>1) Desteksiz</p> <p>2) Yerel bulonlama</p> <p>3) Sistematik bulonlama</p> <p>4) Sistematik bulonlama (ve takviyeli, püskürtme beton 4-10 m)</p> <p>5) Lifle güçlendirilmiş püskürtme beton 5-9 cm</p> | <p>6) Lifle güçlendirilmiş püskürtme beton ve bulonlama, 9-12 cm</p> <p>7) Lifle güçlendirilmiş püskürtme beton ve bulonlama, 12-15 cm</p> <p>8) Lifle güçlendirilmiş püskürtme beton >15 cm, güçlendirilmiş Çelik hasırlı püskürtme beton ve bulonlama</p> <p>9) Beton kaplama</p> <p>5) Lifle güçlendirilmiş püskürtme beton 5-9 cm)</p> |
|--|---|

Şekil 2.2. Q sistemine göre destek seçimi abağı [22]

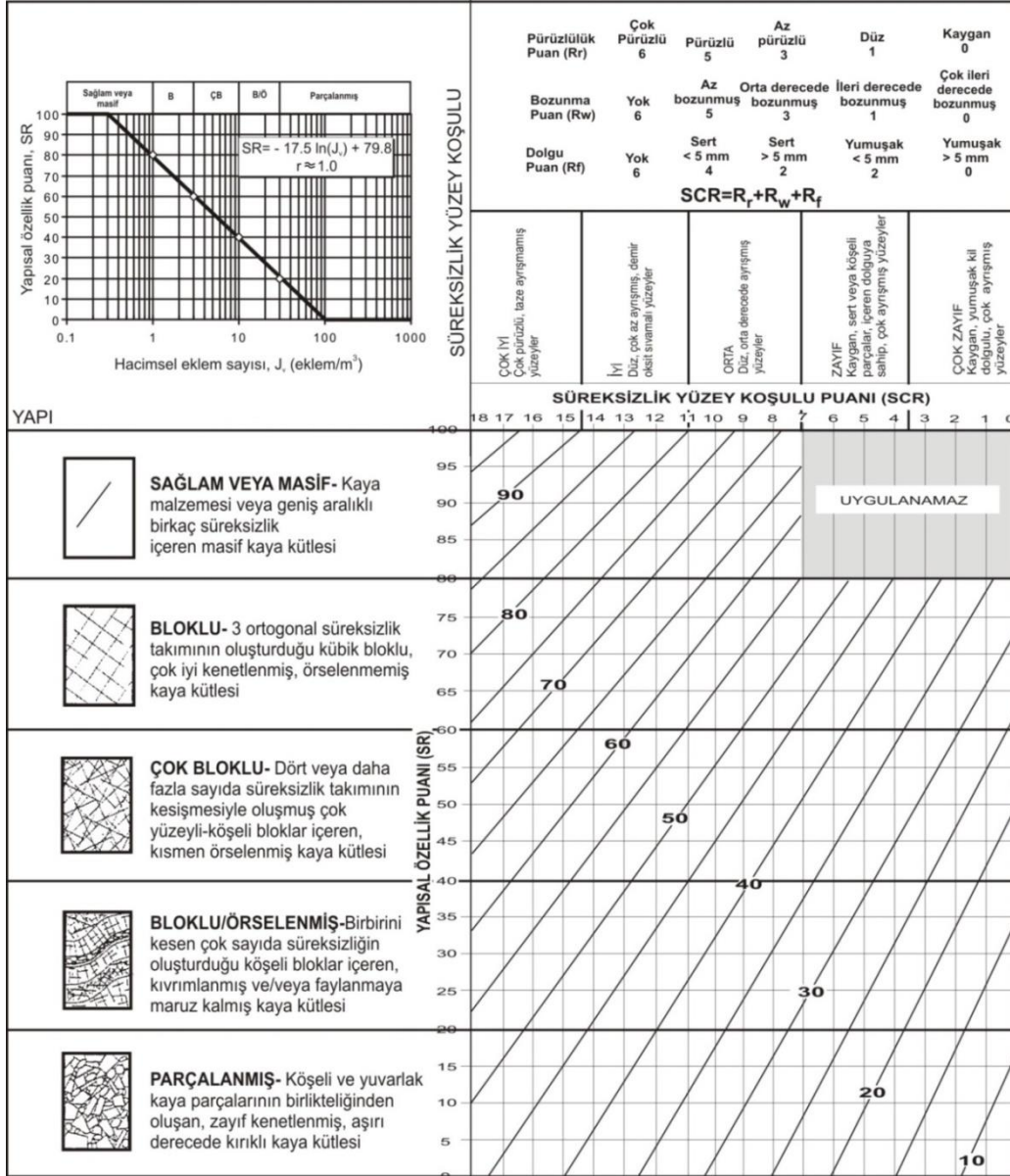
2.1.3. Jeolojik Dayanım İndeksi (GSI)

Hoek ve Brown görgül yenilme ölçütü, Hoek ve Brown [22] tarafından ilk defa önerildiği 1980'den günümüze birçok değişim geçirmesine karşın en yaygın kullanılan görgül dayanım ölçütlerinin başında gelmektedir. Ölçütün "m_b" ve "s" parametrelerinin belirlenmesinde RMR puanı kaya kütlelerinin kalitesinin sayısal bir ölçüsü olarak uzun bir dönem boyunca kullanılmıştır. Ancak, RMR'ın özellikle zayıf kaya kütlelerini tanımlamadaki sınırlamalarından dolayı bir dizi çalışmanın ürünü olarak Jeolojik Dayanım İndeksi (Geological Strength Index, GSI) sisteme dahil edilmiştir [23-27]. Yapısal özellik ve süreksizlik yüzeyinin koşulunu dikkate alan GSI sisteminin son şekli Marinos ve Hoek [26] tarafından önerilmiştir (Şekil 2.3). Bununla birlikte, başlangıçta gözleme dayalı önerilen GSI sisteminin sayısal versiyonu ile ilgili ilk çalışması Sönmez ve Ulusay [28] tarafından yapılmış olup,

yine Sönmez ve Ulusay [29] ilk yaklaşımlarını güncellemişlerdir (Şekil 2.4). Tez çalışması kapsamında sayısal GSI abağı kullanılmıştır.

<p>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)</p> <p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. <u>Note that the table does not apply to structurally controlled failures.</u> Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		<p>SURFACE CONDITIONS</p> <p>VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces</p> <p>GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces</p> <p>FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces</p> <p>POOR Slitkenised, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments</p> <p>VERY POOR Slitkenised, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings</p>				
<p>STRUCTURE</p>		<p>DECREASING SURFACE QUALITY →</p>				
 <p>INTACT OR MASSIVE - Intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities</p>	80	75	70	65	N/A	N/A
 <p>BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets</p>	70	65	60	55	50	45
 <p>VERY BLOCKY- Interlocked, partially disturbed mass with multifaceted angular blocks formed by 4 or more joint sets</p>	60	55	50	45	40	35
 <p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity</p>	50	45	40	35	30	25
 <p>DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces</p>	40	35	30	25	20	15
 <p>LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes</p>	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	10

Şekil 2.3. GSI sınıflama abağının son şekli [26]



Şekil 2.4. Sönmez ve Ulusay [29] tarafından önerilen sayısal GSI abağı

GSI değeri de RMR ve Q ile benzer bir şekilde dayanım ve deformasyon parametrelerinin belirlenmesinde kullanılabilir. Hoek ve Brown yenilme ölçütü ve ilgili deformasyon eşitlikleri pek çok ticari yazılımda kullanıldığı gibi bu tez çalışmasında kullanılan Phase2 programında da dayanım ve deformasyona yönelik girdi parametresi seçiminde yer bulmuştur.

Kaya kütlelerini tanımlayıcı bilgilere ve RMR, Q ve GSI gibi sınıflama sitemlerine ilişkin daha ayrıntılı bilgilere Ulusay ve Sönmez [27]'den ulaşılabilir.

2.2. Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi (NATM)

Gelişen teknolojik makine ve ekipmanlar nedeniyle, tünel açma yöntemlerinde de farklılıklar gözlenebilmektedir. Tünel açma yöntemlerine örnek olarak Alman,

İngiliz, Eski Avusturya, Belçika ve İtalya yöntemleri gösterilebilir. Bu sistemlerde genel olarak tünel kesiti kısa aralıklara bölünerek geçici destek ahşap malzemelerle yapılmakta ve nihai kaplama olarak da kalın örme taş duvarlı kemerler kullanılmaktadır.

Teknolojik gelişmelerle birlikte geliştirilen “Yeni Avusturya Tünel Methodu (NATM)” tünel kazı yöntemi günümüzde hala sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle Avusturya Alpleri’nde elde edilen deneyimlerden ortaya çıkan yöntemin, ilk uygulaması 1969’da Frankfurt metro inşaatında olmuştur. İlk kez Prof. L.V. Rabcewicz tarafından ortaya atılan Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (New Austrian Tunneling Method – NATM) dünyada ve Türkiye’de yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir. Rabcewicz 1948 yılında patent için başvurduğunda NATM için şu tanımlamayı yapmıştır; *“İnce geçici bir destekleme yerleştirmek ve deformasyonlara izin vermek yoluyla kaya basıncının düşürülmesi ve bu basıncın çevreleyen kayaya dağıtılmasıdır. Böylece son destekleme daha az yüklenecek ve sonrasında daha da ince bir yapı halinde son destekleme yerleştirilebilecektir. Deformasyonlar ölçümler ile gözlenmeli ve sonuçlar yapısal analiz ve tasarımı ile birlikte değerlendirilmelidir.”*. Yöntemin diğer önemli felsefesi ise; özellikle zayıf kaya koşullarında kazıyı farklı küçük kesitlerde uygulayarak bölümlendirmektir [30].

Sonuç olarak, NATM bir sınıflamadan ziyade tünel açma yöntemidir. “Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi (NATM)” hakkında bazı farklı görüşlere karşın, yöntemin genel prensipleri günümüzde halen geçerliliğini korumaktadır. Bu prensipler;

- i. Tünel kesitinin çevreleyen zemin ve kayanın dayanımı korunmalı ve hatta mümkün olduğunca maksimum seviyeye arttırılmalıdır.
- ii. Tünel kesiti çevresindeki kaya ve zeminin nihai dayanıma güvenli bir şekilde ulaşması için deformasyonun kontrollü bir şekilde artması gerekmektedir. Bu nedenle yenilmeye neden olabilecek dayanım kayıplarına ve kabul edilmeyecek oturmalara sebebiyet veren aşırı deformasyonlara engel olunmalıdır.
- iii. Tünel kesitindeki dayanım koşulları; sistematik bulonlama ve çelik hasırlı püskürtme beton ile sağlanabilir. Burada önemli olan kullanılan destek

- elemanlarının tüneli çevreleyen zemin ve kaya ortamıyla tam temasta olması ve onunla birlikte deforme olmasıdır.
- iv. Deformasyonun kontrolü için destek elemanlarının kapatılma zamanları oldukça önemlidir.
 - v. Yapılan ilk tahkimatlar, gerekli olabilecek tüm destek sisteminin önemli bir kısmını veya tamamını temsil edebilir. Sonraki aşamalarda (nihai) desteklemenin boyutu ilk destek elemanlarındaki deformasyonların gözlenmesi ile uygulanır.
 - vi. İmalat aşamasında tünelin desteksiz bırakılmış kesimi oldukça az olmalıdır.
 - vii. Projenin yapım aşamaları ve tasarımı sırasında yer alan tüm taraflar (müteahhit, kontrol mühendisleri, proje mühendisleri vb.) “Yeni Avusturya Tünelcilik Yöntemi” nin prensiplerini iyi anlamış olmalı, karar verme ve sorunların giderilmesi konularında birlikte hareket etmelidirler.

NATM’e göre yer altı açıklığının tasarlandığı kaya ortamı; dayanım, kazılabilirlik ve ihtiyaç duyduğu tahkimat türlerine ve sıklığına bağlı olarak A, B ve C şeklinde 3 ana grup ile 10 alt gruba ayrılmıştır (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.3. NATM (ONORM 2203) sınıflaması kazı ve destek sınıfları [31]

Kaya Sınıfı		Konvansiyonel Kazıda Kazı ve Destekleme	Süreklili Kazıda Kazı ve Destekleme
A	A1 stabil	Destekleme elemanına gerek yoktur. Kazı uzunluğu teknik olarak yapılabiliğe bağlıdır.	Destekleme elemanına gerek yoktur. Desteksiz durma süresi 3 haftadan fazladır.
	A2 sonradan az sökülün	Destekleme bölgesel olarak tünel tavanında, yan duvarların üst kısmında dökülmeyi önlemek için gereklidir. Kazı uzunluğu kazı profilindeki aşırı sökülmelere bağlıdır.	Destekleme bölgesel olarak tünel tavanında, yan duvarların üst kısmında dökülmeyi önlemek için gereklidir. Destekleme elemanı yerleşimi bir sonraki adımdaki makinalı çalışmayı engellemeyecek şekilde yerleştirilmelidir. Desteksiz durma süresi 4 gün - 3 haftadır.
B	B1 gevrek	Sınırlı bölgelerde sistematik destekleme gereklidir. Lokal olarak ön destekleme gerekebilir. Kazı uzunluğu zeminin desteksiz durma süresine desteksiz açıklığa, destekleme elemanı yerleştirme süresine bağlı olarak ayarlanmalıdır.	B1.1. Bir sonraki aşamadaki kazıyı engellemeyecek şekilde özellikle tavanda, yan duvarların üst kısmında sistematik destekleme gereklidir. Desteksiz durma süresi 2-4 gündür. B1.2. Tünel tavanı ve yan duvarlarda sistematik destekleme gereklidir. 1. ve 2. rauntlarda destekleme yerleştirilmesi kademeli yapılır. Makinalı kazı destekleme elemanı yerleştirilmesinden etkilenir. Desteksiz durma süresi 10 saat 2 gündür.

Çizelge 2.3. devam ediyor.

Kaya Sınıfı		Konvansiyonel Kazıda Kazı ve Destekleme	Sürekli Kazıda Kazı ve Destekleme
B	B2 çok gevrek	Tünel tavanı, yan duvarlarda ve çoğunlukla aynada sistematik destekleme gereklidir. Sistematik olarak ön destekleme gereklidir. Kazı tünel kesitine bağlı olarak bölünür. Kazı uzunluğu desteksiz durma süresi ve desteksiz açıklığa bağlı olarak belirlenmelidir.	B2.1. Aynanın hemen arkasında sistematik destekleme başlamalıdır. Desteklemenin yapılma süresi kazı hızını belirler. Tıraşlama kademeli yapılır. Desteksiz durma süresi 5-10 saattir. B2.2. Birinci çalışma bölgesinde tüm kesitte sistematik destekleme ve aynada ön destekleme gereklidir. Desteksiz durma süresi ön destekleme olmadan 2-5 saattir.
	B3 taneli	Bölünmüş kazı ile ilerleyebilmek için kaya kütlelerini iyileştirici, desteksiz durma süresini artırıcı önlemler alınmalıdır. Tüm kesit çevresinde ve aynada destekleme gereklidir.	Tünel açma makinesi ile sürekli kazı sadece özel önlemlerle yapılabilir. Desteksiz durma süresi iki saatten azdır.
C	C1 dağ atma	Destekleme elemanları olarak kısa ama sık yerleştirilmiş-kaya bulonları. Çelik hasır gereklidir. Ek tedbir olarak kaya kütleindeki basıncı azaltıcı delikler açılabilir. Bu yöntemle dağ atmalarında önlenir.	Kısa ama sık kaya bulonu yerleştirilmelidir. Birinci çalışma bölgesinde çelik hasır uygulanır. Makine ilerlemesi pek engellenmez.
	C2 baskılı	Genelde tünel aynası stabil olduğundan tüm kesit çevresinde sistematik destekleme gereklidir. Destekleme elemanlarının görevi kırılmaları sınırla-maktır. Tünel aynası büyüklüğü destekleme fonksiyonunu koruyacak şekilde seçilmelidir. Kazı adımı uzunluğu ayna stabilitesine bağlıdır.	C2.1. Tavanda ve yan duvarların üst kısmında sistematik destekleme gereklidir. 1. ve 2. çalışma bölgesinde destekleme elemanları kademeli olarak yerleştirilir. Makineli kazı destek elemanı yerleştirilmesinden etkilenir. Tünel kazı makinesinin sıkışmasına karşı önlem alınmalıdır. Desteksiz durma süresi 10 saat-2 gündür. C2.2. Tünel aynasının hemen arkasında sistematik destekleme gereklidir. Destekleme elemanlarının yerleştirilmesi kazı ilerleme hızını belirler. Traşlama sadece aşamalı olarak yapılabilir. Kazı makinesinin sıkışmasının engellemek için önlem alınmalıdır. Desteksiz durma süresi 5-10 saat arasındadır.
	C3 çok baskılı	Her kazı aşaması için destekleme gereklidir. Bölünmüş kazı büyüklüğü ön desteklemeye bağlı olarak seçilmelidir. Deformasyonların büyüklüğü deformasyon yarıkları veya deforme olabilen iksa kullanımını gerektirir. Kazı adımı uzunluğu deformasyon oluşum hızına ve aynanın duraylılığına bağlıdır.	Tünel aynasında ve kesit çevresinde sistematik destekleme gereklidir. Kazı makinesinin sıkışmasını engellemek için önlem alınmalıdır. Desteksiz durma süresi 2-5 saattir.

Çizelge 2.3. devam ediyor.

Kaya Sınıfı		Konvansiyonel Kazıda Kazı ve Destekleme	Süreklili Kazıda Kazı ve Destekleme
	C4 akıcı	Önden yapılan desteklemeler veya özel destekleme önlemleri ile tünel aynasının destek etkisi sayesinde sınırlı kazı yapılmasına olanak verilmesi mümkündür.	TBM ile ilerleme sadece özel önlemler alınırsa mümkündür. Desteksiz durma süresi 2 saatten azdır.
	C5 şişen	Destekleme elemanları veya başka önlemler ile şişmelerin zararsız olması sağlanabilir.	TBM ile ilerleme sadece özel önlemler alınırsa mümkündür. Desteksiz durma süresi verilmemiştir.

2.3. Yerindeki (Arazideki) Gerilme Koşulları

Doğal topoğrafyada ilave bir yükleme yapılmamışsa ve jeolojik sebeplerden ötürü başka bir yük bulunmuyorsa kaya kütlelerinin kendi ağırlığından dolayı, belirli bir derinlikteki düşey gerilme aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir.

$$\sigma_v = \gamma z \quad (2.3)$$

Bu eşitlikte, γ : Birim hacim ağırlık (kN/m^3), z : Derinlik (m)'dir.

Bununla beraber, her malzeme bünyesinde düşey gerilmeye maruz kalması sonucu yanal gerilme meydana gelir ve kaya malzemelerin kendine özgü özel mekanik özellikleri bu durumu denetler [32]. Her kaya malzemesinin maruz kaldığı düşey gerilmeyi yanal olarak aktarma oranı ("k" katsayısı) her kayaç için farklılık göstermektedir. Kaya ortamına uygulanan normal gerilme sonucunda, birimin sahip olduğu poisson oranına bağlı olarak yanal birim deformasyon gözlenmektedir. Karpuz ve Hindistan, [8] tarafından da belirtildiği üzere, düşey ve yanal birim deformasyonların farklı mertebelerde olması yanal ve düşey gerilmelerin farklı olmasından kaynaklanıp, bu durum homojen ve izotrop kaya birimlerine ait bir özelliktir. Homojen, izotrop ve elastik ortamlarda, "k" parametresi ile poisson oranı (ν) arasında aşağıdaki gibi bir bağıntı bulunmaktadır.

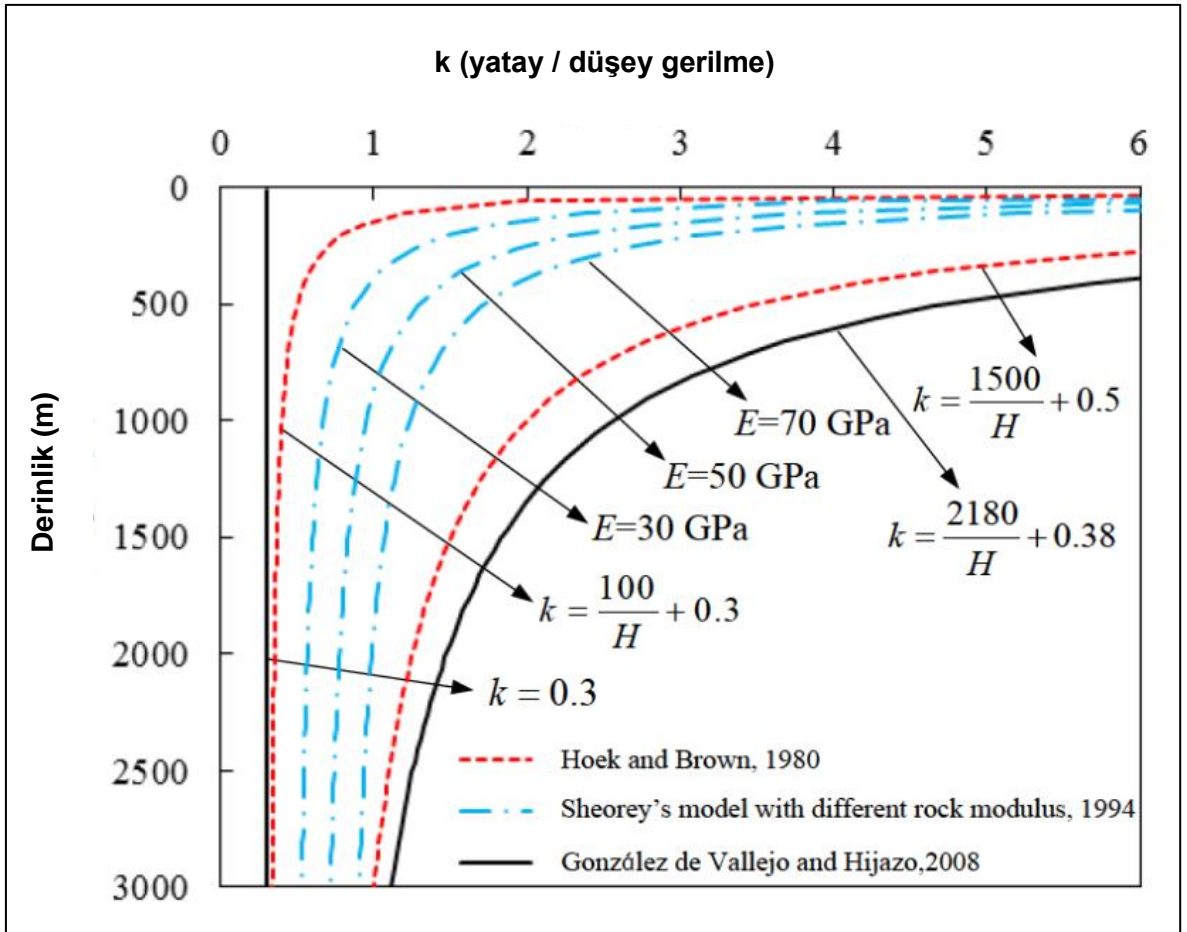
$$k = \nu / (1 - \nu) \quad (2.4)$$

Tüm bunlara ek olarak, yer altında meydana gelen yanal gerilmelerin tek sebebi poisson oranı ve düşey gerilmeler değildir. Poisson oranı kaya malzemesine

yönelik bir özellik olup, yer altındaki birincil anlamdaki gerilme yoğunluklarını etkileyen başka birçok etken daha bulunmaktadır [33]. Sheorey [1] tarafından önerilen eşitlik, derinliğe bağlı olarak “k” parametresinin değişimini göstermektedir. Bu yaklaşıma göre “k” parametresi derinliğe bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde ortamın elastisite modülüne bağlı olarak değişmektedir (Şekil 2.5).

$$k = 0.25 + 7E_h(0.001 + \frac{1}{z}) \quad (2.5)$$

Bu eşitlikte, E_h : “k” parametresinin belirleneceği noktanın üst seviyelerindeki ortalama elastisite modülü (MPa) ve z: Derinlik (m)’dir.



Şekil 2.5. Derinliğe bağlı olarak gelişen “k” parametresi ilişkileri [1]

Genel olarak topoğrafya, tektonik kuvvetler ve diğer bazı jeolojik özelliklerden dolayı “k” parametresi 1’den büyük olabilmektedir. Örnek olarak, sıkıştıma gerilmelerinin bir ürünü olarak ters atımlı fayların olduğu bölgelerde “k” oranı 1’den

büyük olabilmektedir. Diğer taraftan erozyon da yatay gerilmelerin düşey gerilmelerden büyük olmasının bir diğer sebebi olarak gösterilebilmektedir.

2.4. Sayısal Modellemeler

Yazılım ve bilgisayar teknolojilerindeki gelişimle birlikte 1D, 2D ve 3D vaka tanımlamalarının yapılabildiği, sonlu elemanlar yöntemi, sonlu farklar yöntemi, ayırık elemanlar yöntemi gibi sayısal modelleme çözümleri mühendislik alanındaki uygulamalarda vazgeçilmez bir tercih olmuştur. Tez çalışması kapsamında sonlu elemanlar modellemesi kullanılmıştır.

Tez çalışması kapsamında, iki boyutlu sonlu elemanlar modellemesinin yapılabildiği Phase2 programı kullanılmıştır. İki boyutlu (2D) çözümlerden üç boyutlu (3D) modellemeye yaklaşım yapılmasına yönelik olarak, “https://www.rocscience.com/help/rs2/pdf_files/tutorials/Tutorial_18_3D_Tunnel_Simulation_using_Core_Replacement.pdf” web adresinden ulaşılabilen eğitim yazısındaki Çekirdek Değişirme Tekniği (Core Replacement Technique, Material softening) dikkate alınmıştır.

3. SAYISAL MODELLEME GİRDİ PARAMETRELERİ

Tez çalışması kapsamında, yatay gerilmenin düşey gerilmeye olan oranının (k parametresi) olası gerçekçi sınır değerler içerisindeki değişimi ve ayrıca ikiz tüneller arasındaki uzaklık değişiminin, deformasyon ve plastik bölge analiz sonuçlarına olan etkisinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Yapılan analizlerin gerçekçiliğini sağlamak amacıyla, Karayolları 13. Bölge Müdürlüğü idaresinde yer alan “Gazipaşa - 5. Bölge Hududu Yolu Etüt ve Proje Danışmanlık Hizmet Alımı İşi” bünyesinde projelendirilen Gökçebelen Tüneli’ne ait örnek bir ikiz tünel kesitinin ve diğer gerekli girdi parametrelerinin kullanılması tercih edilmiştir.

Tez çalışmasının bu bölümünde Öner [34] tarafından söz konusu Gökçebelen Tüneli’ne ilişkin çalışmadan tez çalışmasının amacına yönelik olarak gereksinim duyulan girdi parametreleri derlenmiştir.

3.1. Kaya Kütleli Sınıflama Sistemlerine Göre Yapılan Değerlendirmeler

Gökçebelen Tüneli’nin uygulamaya dönük jeolojik-jeoteknik değerlendirmeleri Öner [34] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmadan k değerindeki olası değişimin belirgin bir şekilde izlenebilmesi için derin bir kesit seçilmesi öngörülmüş ve yaklaşık ~440 m derinliğindeki Şekil 3.1.’de sunulan Km: 70+155 en kesiti tez çalışmasında tercih edilmiştir.

Bu en kesit profilindeki ikiz tünel yüzeyden yaklaşık 440 m derinlikten geçmekte olup, içerisinde geçtiği hakim jeolojik birim kalkışist kaya kütlelidir. Ayrıca yaklaşık yatay konumlu ince bir kireçtaşı kaya kütleli de bulunmaktadır.

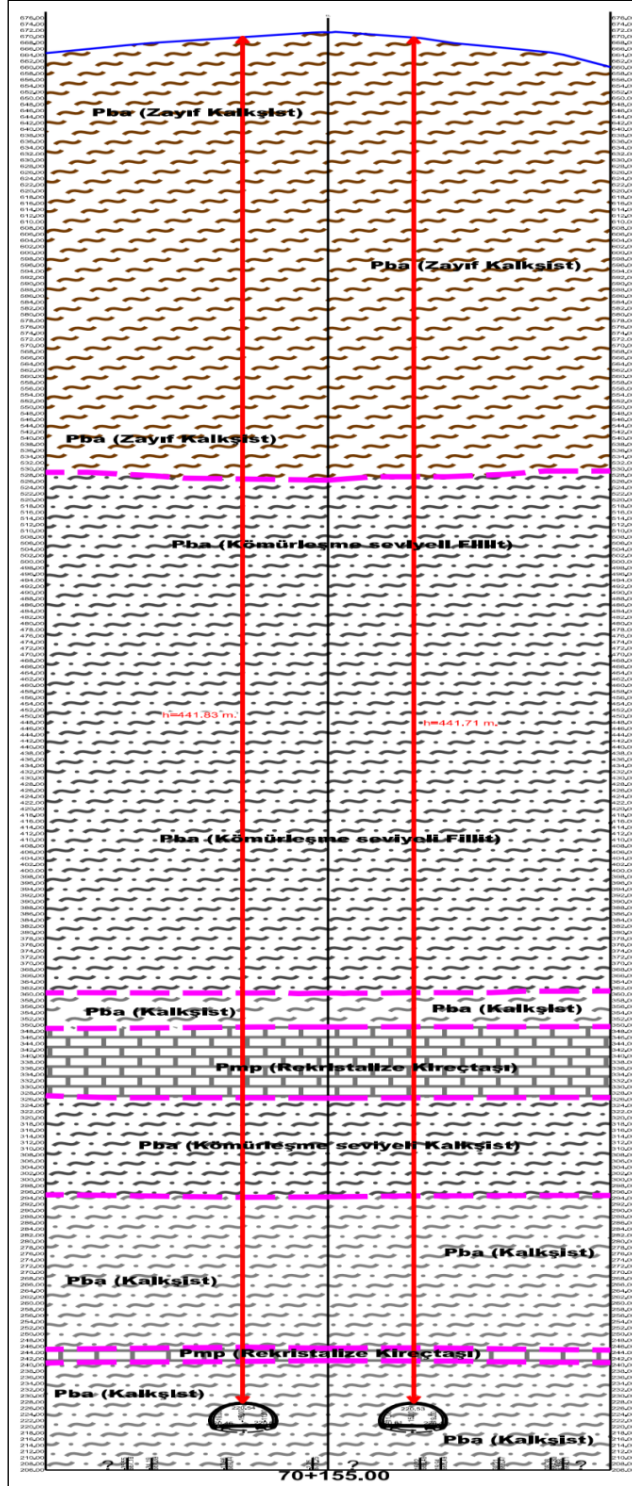
Öner [34] tarafından yapılan çalışmada sunulan bilgiler doğrultusunda, hakim jeolojik birim olan şist kaya kütlelerinin RMR ve Q hesaplaması Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Jeomekanik parametreler ve RMR puanı [34]

	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)	RQD (%)	Süreksizlik Aralığı (mm)	Süreksizlik Uzunluğu (m)	Süreksizlik Açıklığı (mm)	Pürüzlülük	Dolgu	Bozunma	Yer altı Suyu	Süreksizlik Yönelimi	Puan
Tanım	63	39	~200	1 – 3	0.1 – 1	Düz	Sert < 5 mm	Az	Nemli	Orta	RMR 45 (Orta Kaya)
Puan	7	8	7	4	4	1	4	5	10	-5	

Çizelge 3.2. Q (NGI) sınıflaması [34]

	RQD (%)	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q Değeri
Değeri	39	2.G	3.F	4.B	5.A	6.F	1.300
		12	1	1	1	2.5	



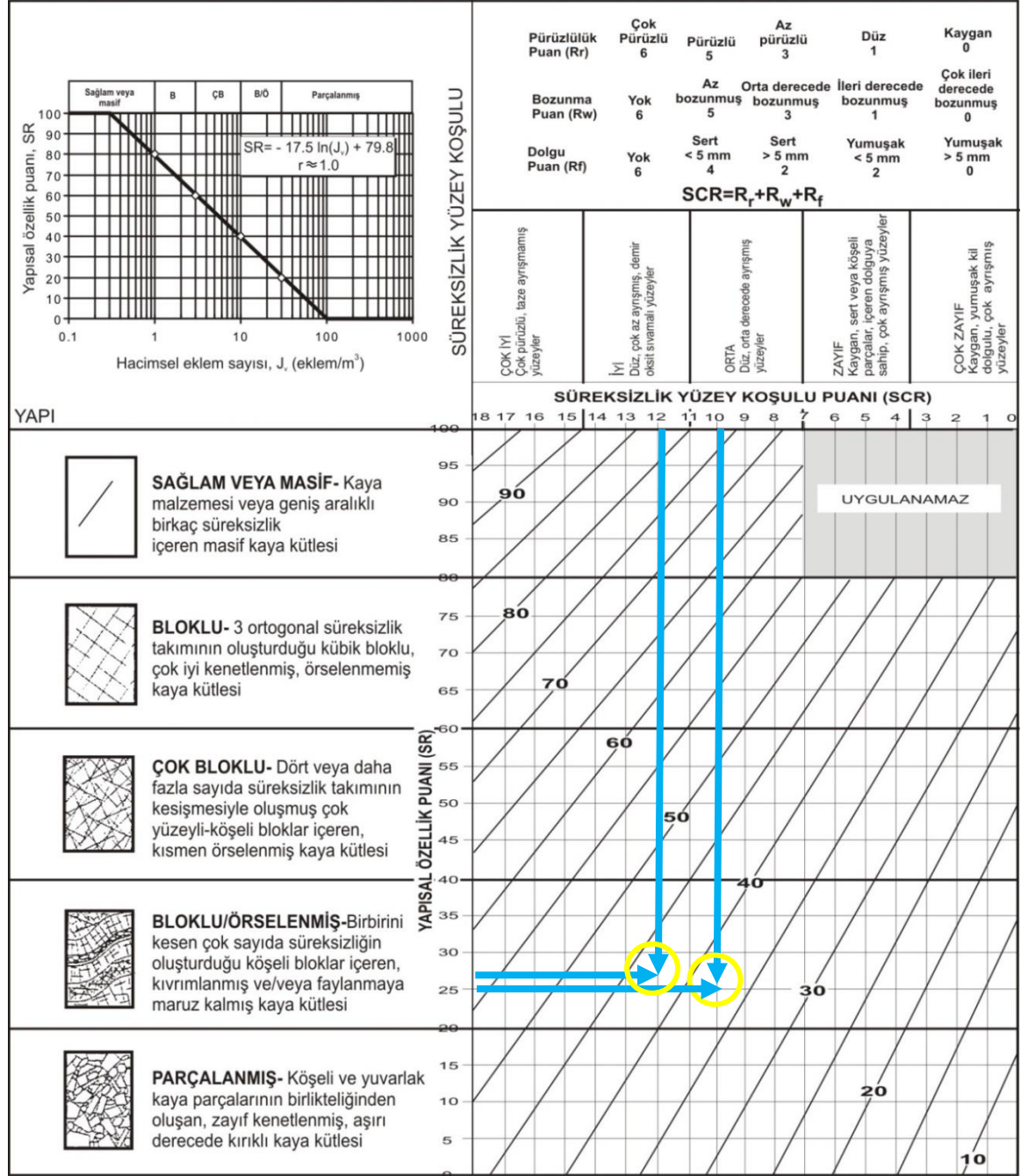
Şekil 3.1. Gökçebelen Tüneli Km: 70+155 enkesiti [34]

“Yeni Avusturya Tünel Metodu (NATM)” yöntemine göre tez kapsamında dikkate alınan en kesite ilişkin değerlendirme Şekil 3.2’de, ÖNORM’a göre kazı ve destek sınıfı ise B2 (Çok Gevrek Kaya) olarak verilmiştir.

	BARTON KAYA KÜTLESİ NİTELİĞİ (Q)	BIENIAWSKI KAYA KÜTLESİ DEĞERİ (RMR)	ÖNORM B2203 EKİM 1994 ÖNCESİ	ÖNORM B2203 EKİM 1994 SONRASI	AÇIKLAMALAR
1000		101			
400	SON DERECE İYİ	94			
	PEK ÇOK İYİ	ÇOK İYİ	A1 STABİL	A1 SAĞLAM	
100	ÇOK İYİ 70.4	82.7 80			
40	İYİ	İYİ	A2 AŞIRI SÖKÜLEN	A2 PARÇALI	
10	ORTA 5.34	65		B1 GEVREK	
4	1.300 İF	58	B1 GEVREK	B2 ÇOK GEVREK	
1	0.77	47			
	0.41	45		B3 TANELİ	
0.1	0.11	29	ZAYIF 29	C1 DAĞ ATMA	
	0.03	20		C2 BASKILI	
	0.021	17		C3 ÇOK BASKILI	
0.01	0.015	15		C4 AKICI	
	0.008	10		C5 ŞİŞEN	
	0.002	5	ÇOK ZAYIF	L1 GEVŞEK ZEMİN YÜKSEK KOHEZYON	
0.001		2.5		L2 GEVŞEK ZEMİN DÜŞÜK KOHEZYON	

Şekil 3.2. Q – RMR – ÖNORM kaya sınıfları ilişkisi [35]

Tez kapsamında sayısal modellesi yapılabilen kesitteki hakim birim olan şist ve ince bir seviye halinde yer alan kireçtaşı kaya kütlelerinin GSI puanı değerlendirmeleri Şekil 3.3 ve Çizelge 3.3’de görülmektedir.



Şekil 3.3. Sönmez ve Ulusay [29] tarafından önerilen GSI sınıflama sistemi abağında kalkıştı ve kireçtaşı kaya kütlesi değerlendirilmesi

Çizelge 3.3. Tünel bölgesini çevreleyen kaya kütleleri için GSI değerlendirmesi

Birim	RQD (%)	J _v	SR	SCR	GSI
Rek. Kireçtaşı	39	23	25	Rr = 1, Rw = 5, Rf = 4, SCR = 10	38
Kalkışist	42	22	26	Rr = 3, Rw = 5, Rf = 4, SCR = 12	43

3.2. Dayanım ve Deformasyon Parametreleri

Sayısal arazi modellerinde, jeolojik ortamın kütle dayanımı ve deformasyonu parametrelerine gereksinim olmaktadır. Kaya kütlelerinin dayanımı Hoek ve Brown ampirik yenilme ölçütünün Hoek vd. [36] tarafından önerilen son versiyonuna göre tanımlanmıştır.

Kaya kütlesi için genelleştirilmiş Hoek – Brown yenilme kriteri aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (3.1)$$

Burada σ_1 ve σ_3 en büyük ve en küçük asal gerilmeleri, σ_{ci} kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımını, m_b , s ve a ise GSI ve örselenme derecesine göre hesaplanan boyutsuz sabitleri temsil etmektedir. İyi kenetlenmiş ve köşeli kaya parçalarından oluşan, iyi kaliteli kaya kütlelerinde eşitlikteki “a” değeri 0.5 alınabilir.

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI-100}{28-14D} \right) \quad (3.2)$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI-100}{9-3D} \right) \quad (3.3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (3.4)$$

Yukarıdaki eşitliklerde, m_b , s ve a boyutsuz sabitler, m_i kaya malzemesine ait “m” parametresi ve D ise örselenme derecesidir.

Farklı yanal gerilme (σ_3) düzeylerinde uygulanan üç eksenli sıkışma dayanımının deney sonuçlarıyla, ölçütün kaya malzemesi için geçerli olan formunda regresyon ile sağlam kaya malzemesinin “ m_i ” sabiti belirlenebilir. Bununla birlikte zaman içerisinde deneysel veri birikimiyle “ m_i ” parametresinin kaya türüne göre seçilmesine olanak sağlayan abaklarda geliştirilmiştir (Çizelge 3.4). Kalkışist ve kireçtaşı kaya

malzemeleri için kullanılacak “m_i” sabitleri Çizelge 3.4’deki abakta görülmektedir.

Çizelge 3.4. Kaya malzemesi türlerine göre Hoek [37] tarafından en son önerilmiş m_i sabiti değerleri ve analizlerde kullanılacak parametreler

Kaya türü	Sınıf	Grup	Doku			
			İri	Orta	İnce	Çok ince
SEDİMANTER	Kırıntılı		Konglomeralar * (21±3)	Kumtaşları 17±4	Silttaşları 7±2	Kilttaşları 4±2
			Breşler (19±5)		Grovaklar (18 ±3)	Şeyller (6±2) Marnlar (7±2)
	Kırıntısız	Karbonatlar	Kristalin kireçtaşı (12±3)	Sparitik kireçtaşları (10±2)	Mikritik kireçtaşları (9±2)	Dolomitler (9±3)
		Evaporitler		Jips 8±2	Anhidrit 12±2	
	Organik				Tebeşir 7±2	
METAMORFİK	Foliasyonsuz		Mermer 9±3	Hornfels (19±4) Metakumtaşı (19±3)	Kuarsit 20±3	
	Az foliasyonlu		Migmatit (29±3)	Amfibolitler 26±6		
	Foliasyonlu **		Gnays 28±5	Şistler 12±3	Fillitler (7±3)	Sleytler 7±4
MAGMATİK	Plutonik	Açık renkli	Granit 32±2	Diyorit 25±5		
		Koyu renkli	Granodiyorit (29±3)	Dolorit (16±5)		
	Hipabisal		Porfiriler (20±5)		Diyabaz (15±5)	Peridodit (25±5)
	Volkanik	Lav		Riyolit (25±5) Andezit 25±5	Dasit (25±3) Bazalt (25±5)	Obsidiyen (19±3)
		Piroklastik	Aglomera (19±3)	Breş (19±5)	Tüf (13±5)	

* Konglomeralar ve breşlerin m_i değerleri, bağlayıcı malzemenin özelliğine ve çimontalanma derecesine göre geniş bir aralığa sahip olup, kumtaşlarınınkine benzer değerlerden ince taneli kayaçlarınkine değin değişen aralıklar sergileyebilirler.

** Bu değerler, tabakalanmaya veya foliasyona dik yönde test edilmiş kaya malzemesi örnekleri içindir. Eğer zayıflık düzlemi boyunca yenilme meydana gelirse, m_i değeri önemli ölçüde farklılık gösterir.

*** Parantez içindeki değerler tahminidir.

İkiz tünellerin üzerindeki örtü yüksekliğinin en fazla olduğu en kesite yakın konumlu TSK-70+940 temel araştırma sondaj verilerinden elde edilen laboratuvar deneylerine ilişkin sonuçlar dikkate alınmıştır (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5. Jeomekanik deney verileri (Öner [34]'den düzenlenmiştir)

Sondaj No	Örnek No	Doğal Birim Hacim Ağırlık	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı	Elastisite Modülü	Poisson Oranı (ν)	Nokta Yüğü Dayanım İndeksi
		γ_n (kN/m^3)	σ_c (MPa)	E_i (GPa)		$I_{s(50)}$ (MPa)**
TSK-70+940	N-1	27.2	25.2	28.94	0.23	x
	N-2	27.5	96.0	76.36	0.18	x
	N-3	27.9	45.8	62.50	0.26	x
	N-4	27.8	*	*	*	2.43 (58.3)
	N-5	27.2	*	*	*	2.32 (55.7)
	N-6	28.2	*	*	*	1.96 (47.0)
	N-7	27.7	66.7	57.70	0.24	x
	N-8	27.0	78.2	67.98	0.20	x
	N-9	27.3	52.2	31.63	0.19	x
	N-10	28.2	101.0	90.16	0.25	x
	N-11	27.7	25.2	*	*	2.02 (48.5)
Ortalama		27.6	66.4	59.3	0.22	2.18 (52.4)

*: Örnek hazırlanamamıştır. **: σ_c değeri Bieniawski [9] tarafından önerilen $\sigma_c = I_{s50} * 24$ ilişkisiyle hesaplanmıştır ve parantez içinde verilmiştir [8].

Tez çalışması kapsamında, tünelin inşaa edileceği derinliklerdeki yatay gerilme ile düşey gerilme arasındaki oranın (k parametresi) olası değişiminin deformasyonlara olan etkileri de değerlendirilmiştir. Bu amaçla sayısal modellenmesi yapılan en kesit için k değerinin mevcut verilere göre olası değişim aralığı da belirlenmiştir.

Yatay zemin yükünün düşey zemin yüküne olan oranı “k” değeri aralığı, Sheorey [1] tarafından önerilen aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$k = \frac{k_H}{k_V} = 0.25 + 7Em \text{ (GPa)} \times (0.001 + \frac{1}{h}) \quad (3.5)$$

Bu eşitlikte, h derinlik olup, söz konusu en kesit için 442 m'dir. Bu durumda, k parametresinin hesaplanmasında olası değişken kaya kütlelerinin elastisite modülü

(Em) olarak yorumlanabilir. Bu belirlemenin ışığında, literatürdeki mevcut bilinen eşitlikler dikkate alınarak hakim birim olan kalkışta ait Em'nin söz konusu en kesit için olası değişim aralığı belirlenmiştir (Çizelge 3.6).

Çizelge 3.6. Kaya kütlelerinin deformasyon modülünün belirlenmesi için önerilen bazı eşitlikler ve kalkışta kaya kütlesi için hesaplanan Em değerleri

Eşitliğin Referansı	Eşitlik	Deformasyon Modülü, Em (GPa)
Serafim ve Pereira [38]	$E_m=10^{[(RMR-10)/40]}$	10.00
Hoek ve Brown [25]	$E_m=(\sigma_{ci}/100)^{0.5}10^{(GSI-10)/40}$	3.97
Hoek vd. [36]	$E_m=(1-(D/2))(\sigma_{ci}/100)^{0.5}10^{(GSI-10)/40}$	3.98
Barton [39]	$E_m=10*(Q*\sigma_{ci}/100)^{1/3}$	9.36
Sönmez vd. [40]	$E_m=E_i10^{(((RMR-100)(100-RMR)/4000\exp(-RMR/100)))}$	3.87
Hoek ve Diederichs [41]	$E_m=E_i(0.02+(1-D/2)/(1+e^{((60+15D-GSI)/11)}))$	7.07
Genel Ortalama		6.38

Not: RMR=44, GSI=38, D=0 (örselememiş kaya kütlesi), $\sigma_c=63$ MPa ve $E_i=59.3$ GPa ortalama değerleri kullanılmıştır.

Yukarıdaki çizelgeden görüleceği üzere farklı araştırmacıların önerdikleri eşitliklere göre Em'nin 3.87 GPa ile 10 GPa arasında değişim sergileyebileceği görülmektedir.

Sonuç olarak "k" değeri değişim aralığı;

olası düşük $E_m=3.87$ GPa için;

$$k = \frac{k_H}{k_V} = 0.25 + 7 \times 3.87 \text{ (GPa)} \times \left(0.001 + \frac{1}{442} \right) = 0.34$$

olası yüksek $E_m=10$ GPa için;

$$k = \frac{k_H}{k_V} = 0.25 + 7 \times 10 \text{ (GPa)} \times \left(0.001 + \frac{1}{442} \right) = 0.48$$

olarak hesaplanabilir. Yapılan hesaplamalara göre sayısal modellemesi yapılan en kesitte ikiz tünel uygulama derinliğinde, Sheorey [1] tarafından önerilen ilişkiye

göre “k” değerinin 0.34 ile 0.48 arasında değişebileceği görölmektedir. Bu olası düşük ve yüksek değerler dikkate alınarak, “k” değerindeki değişimin deformasyonlara etkisinin değerlendirildiği bir sonraki bölümde “k” değerinin alt ve üst sınırı yukarıdaki değerleri de içerecek şekilde 0.25, 0.5 ve 0.75 olarak seçilmiştir. Diğer taraftan, analizlerde parametrik değişimlere bağlı olarak değişkenliği sınırlandırmak amacıyla, kalkıştı kaya kütesinin deformasyon modülü ortalama değer olarak 6.38 GPa şeklinde kullanılmıştır.

4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE TÜNEL DEFORMASYON ANALİZLERİ

Son yıllarda artan mühendislik yapısı ihtiyacı ve jeolojik açıdan gittikçe daralan elverişli yapı alanları sebebiyle mühendislik problemleri daha karmaşık hale gelmiştir. Araştırma çalışmalarına verilen önem son yıllarda artsa da bu çalışmalar ne yazık ki hala proje maliyetinin çok küçük ve yetersiz bir payına karşılık gelmektedir. Son yıllarda geliştirilen sonlu elemanlar programları karmaşık yapı zemin ve kaya problemlerinin çözülmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Sayısal çözümlene yapabilen programların genel anlamda çalışma mantığı zemin, kaya ve yapı elemanlarının sonlu elemanlara bölünmesi ve gerilme koşulları altındaki davranışının dayanım ve deformasyon eşitlikleriyle hesaplanmasına dayanmaktadır. Bu elemanlar birbirlerine düğüm ismi verilen köşe noktaları ile bağlanmaktadır. Deformasyonlara bağlı olarak meydana gelen yer değiştirmeler, bir takım fonksiyonlar kullanılarak bu elemanlar içerisindeki düğüm noktalarında tariflenmektedir. Bu programlar sayesinde, sınır koşulları çerçevesinde ve çeşitli yük/gerilme kombinasyonları altında, yapı zemin etkileşimlerine ilişkin statik ve dinamik gerilme analizleri kolaylıkla yapılabilmektedir.

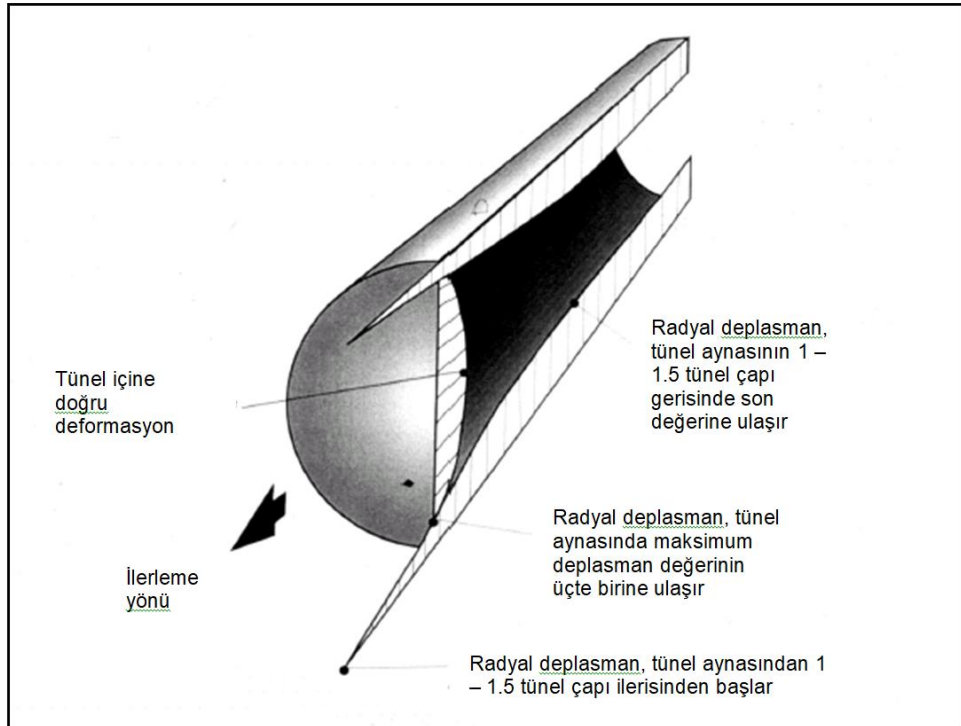
Bir önceki bölümde ayrıntısı sunulan en kesit için sayısal modelleme ve çözümelemeleri Phase2 isimli sonlu elemanlar programı ile yapılmıştır. Phase2, yer altı kazıları için 2 boyutlu gerilme hesabı ve destek sistemi tasarımı için özel olarak geliştirilmiş bir bilgisayar programıdır (<https://www.rocsceince.com>). Program 2 boyutlu analiz yapabildiği için, oluşturulabilecek modeller “Düzlem Birim Deformasyon (Plane Strain)” ve “Eksenel Simetrik (Axisymmetric)” ile sınırlıdır.

Bu çalışmada “Düzlem Birim Deformasyon” modeli kullanılacaktır. Bu noktada, 2 boyutlu modeller kullanarak “Düzlem Birim Deformasyon” analizinin beraberinde getirdiği kabullerden bazıları;

- i. Hazırlanacak modelde kullanılacak sonlu elemanlar ağı örgüsü genişliği için, tünel kazısının yanlarında ve altında yeterli miktarda mesafenin bırakılması (Bazı çalışmalarda tavsiye edilen değerler: yanlarda 3 tünel çapı, altta 2.5 tünel çapı kadar bir mesafe).

- ii. Sınır koşullarının (boundary conditions) deformasyon ve gerilmeleri doğru yansıtacak biçimde seçilmesi.
- iii. Kaya ortamının homojen ve izotropik (her yönde aynı mekanik özelliklere sahip) kabul edilmesi.
- iv. Tünelin açılacağı derinlikte, gerilme ölçümü yapılmadığı için, gerilmelerin derinlikle doğru orantılı ve kayanın birim hacim ağırlığına bağlı olarak arttığı.
- v. Tünelin, analizinin yapıldığı kesite dik yönde, sonsuz uzunlukta olduğu ve bu yöndeki gerilme ve deformasyonların sıfır olduğu.
- vi. Tünel kesitinin boyuna yönde değişmediği şeklinde gösterilebilir.

Çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan gözlemler, deneyler ve analitik çalışmalardan bilindiği üzere, yer altı kazıları etrafındaki deformasyon ve gerilme dağılımları üç boyutlu bir karaktere sahiptir. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi; kaya ortamındaki deformasyonlar ilerlemekte olan bir tünelin aynasından 1.0 - 1.5 tünel çapı ileriden başlayıp, tünel aynasında maksimum (nihai) deplasman değerinin yaklaşık üçte birine ulaşır, tünel aynasının yine 1.0 - 1.5 tünel çapı kadar gerisinde ise maksimum (nihai) deplasman oluşur. Panet ve Guenot [43] bu oranı, nihai deformasyonun %30 u olarak öngörümüşlerdir.



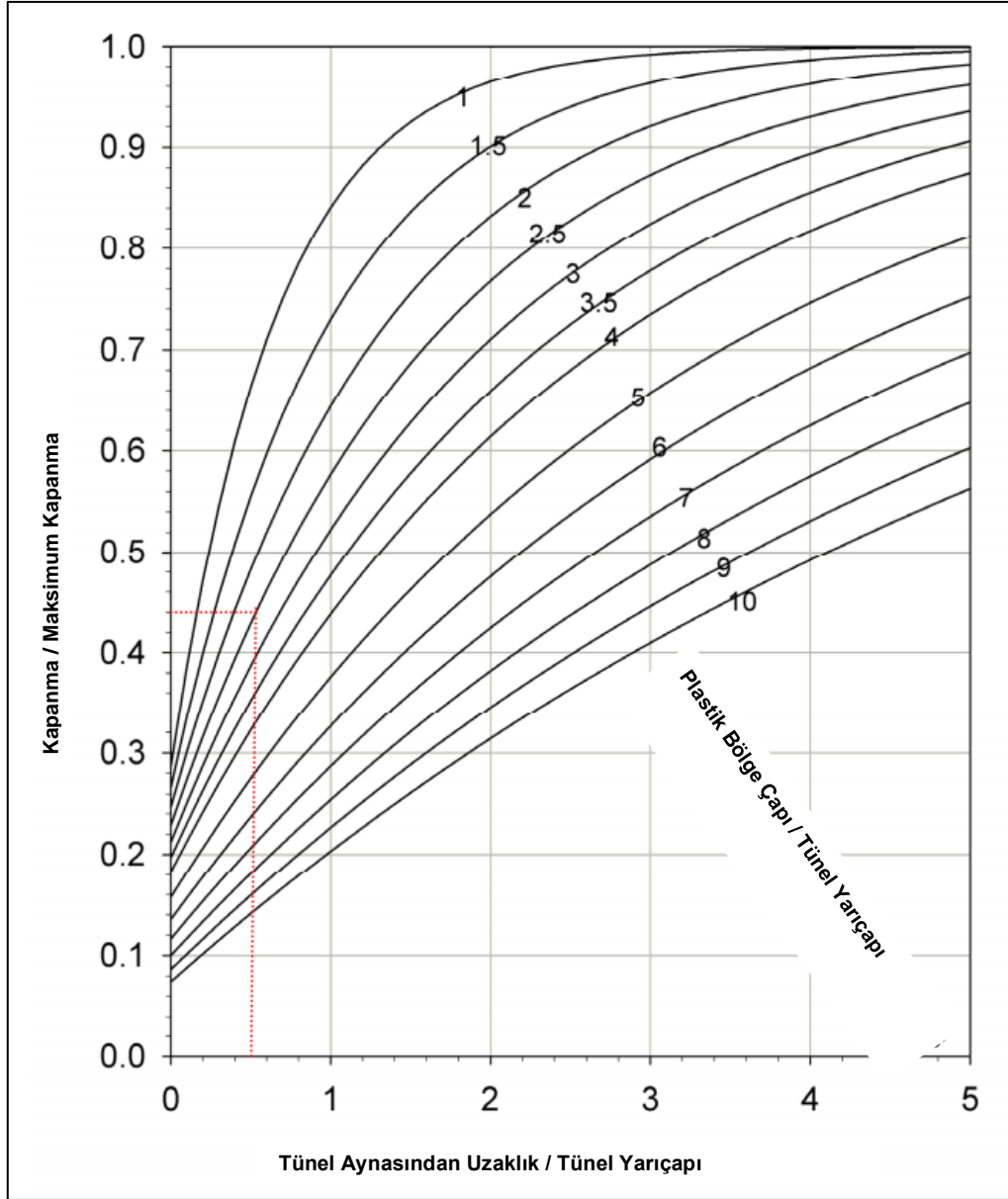
Şekil 4.1. İlerleyen bir tünel kazısı etrafındaki deformasyon patemi [43]

Phase2 programıyla gerçekleştirilen düzlem birim deformasyon ile çözümlemede 2 boyutlu bir sonuç alınırken, Şekil 4.1'den de görüleceği üzere gerçekte deformasyon davranışı üç boyutlu bir değişime sahiptir. Analizlerde 2 boyutlu çözümlemeden 3 boyutlu modellemeye yaklaşım yapılmasına yönelik olarak, "https://www.rocscience.com/help/rs2/pdf_files/tutorials/Tutorial_18_3D_Tunnel_Simulation_using_Core_Replacement.pdf" web adresinden ulaşılabilen eğitim yazısındaki Çekirdek Değiştirme Tekniği (Core Replacement Technique, Material Softening) kullanılabilir. Bu tez çalışmasında da bu yaklaşım dikkate alınmıştır. Burada hedeflenen; 3 boyutlu doğal kaya ortamında oluşacak davranışın, 2 boyutlu olarak hazırlanan bilgisayar modeline gerçekçi ve sağlıklı bir şekilde aktarılması ve adapte edilmesi gerektiğidir.

Yaklaşan tünel kazısının, tünel aynası içerisinde kalan kaya ortamı üzerindeki gevşetici etkisi de destekleme sisteminin alacağı yükün, doğruya en yakın biçimde tahmin edilebilmesi için göz önüne alınmalıdır. 2 boyutlu analizler sonucunda çözüme ulaşan Phase2 programında, 3. boyutun da etkisi yapılan bu değerlendirmelerle dikkate alınmıştır. Bu etki, kayanın elastik parametrelerinin belirli oranlarda azaltılmasıyla yapılan çözümlemeyle sonuçlara yansıtılabilir. Bu çalışmada söz konusu bu durum dikkate alınmış ve uygun aşamalarında analizlere dahil edilmiştir. Tünel iç bölgesindeki (çekirdek bölgesi) kaya kütlesi deformasyon modülünün hangi oranda indirgeneceğine (material softening) ilişkin izlenecek adımlar aşağıda özetlenmiştir.

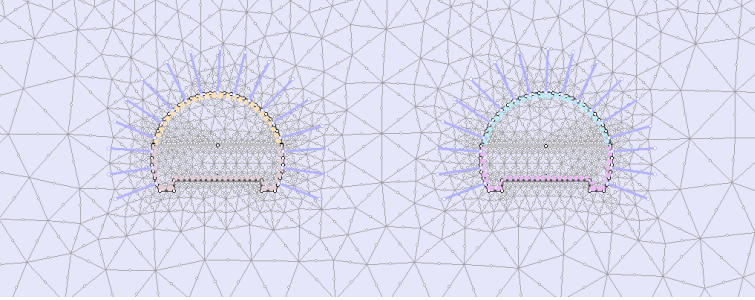
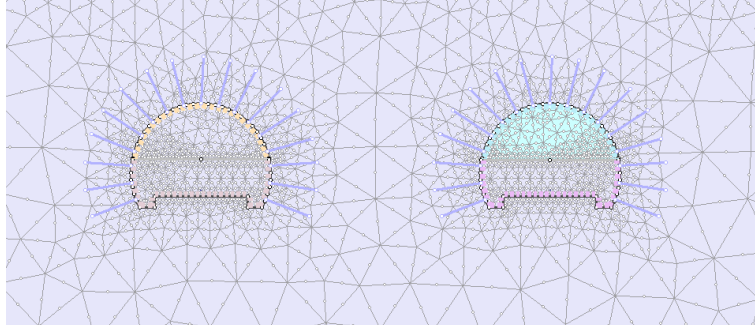
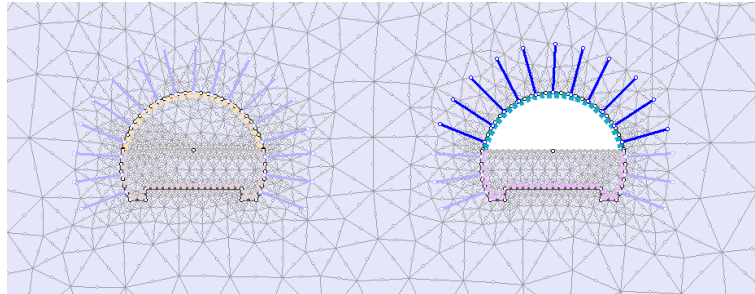
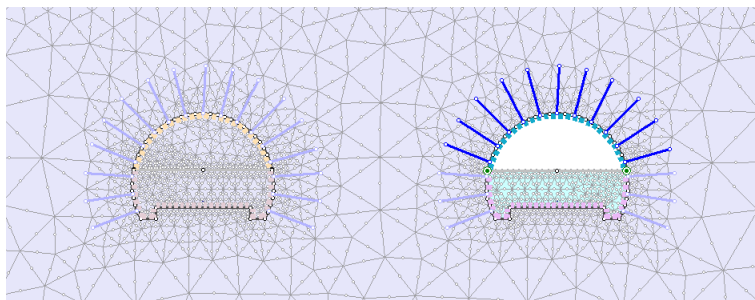
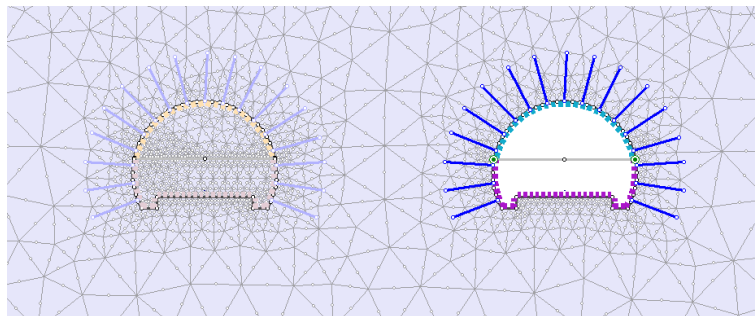
- i. İlgili kesimde yapılacak analizlerde, kazı aynasına yaklaşılacak aşamada elastisite modülünün düşürüleceği değerin tayini için belli bir katsayı bulunması gerekmektedir. Bu değerin tayini için öncelikli olarak desteksiz kesit üzerinde kademe kademe elastisite modülü azaltılmış ve farklı elastisite modülü değerlerine karşılık gelen deplasman miktarları belirlenmiştir. Sonraki aşamada bu iki değişken arasındaki ilişkiyi ortaya koyacak bir grafik (analiz çıktısı) elde edilmiştir.
- ii. Plastik bölge yarıçapı her "k" değişkeni için belirlenerek Vlachopoulos ve Diederichs'in [44] önerdiği abakta kullanılmıştır (Şekil 4.2). Tünel yarıçapı ve aynaya olan uzaklık bilgileri kullanılarak kapanma / maksimum kapanma oranı hesaplanmıştır.

- iii. Son aşamada ise deformasyon değerleri ile elastisite modülü değerlerinin ilişkisini gösteren grafik, maksimum kapanma parametresi eklenerek modifiye edilmiştir. Sonuç olarak ilgili kesit için uygun kapanma/maksimum kapanma oranının karşılık geldiği elastisite modülü değeri, tünel kazısının yaklaştığı analiz aşamasında indirgenmiş elastisite modülü olarak kullanılmıştır.



Şekil 4.2. Destek öncesi deformasyonun belirlenmesi [44]

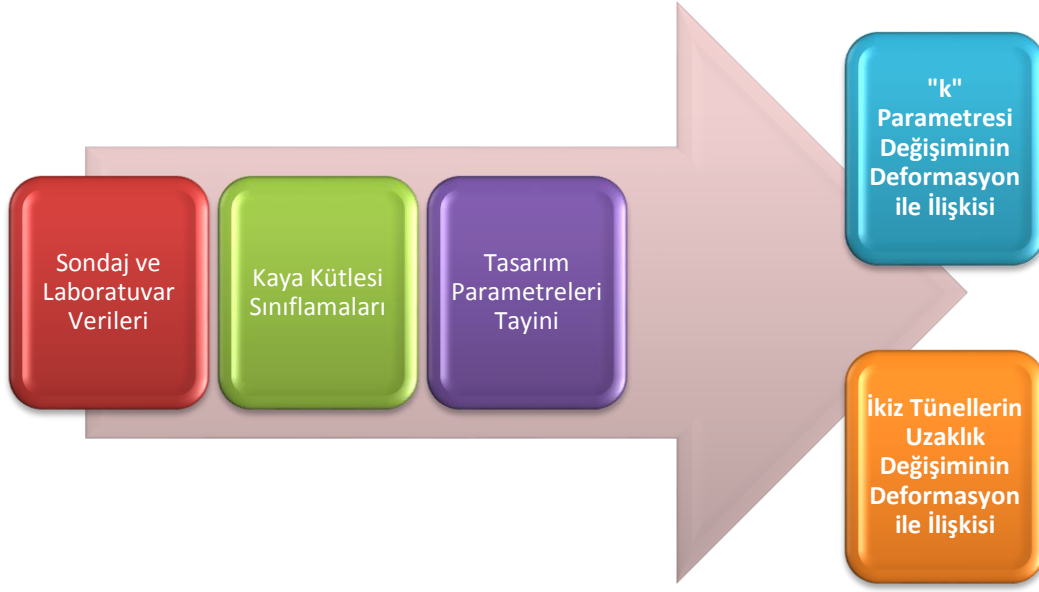
Seçilen en kesite uygulanan sayısal model analizlerinde, imalat aşamalarıyla uyumlu analiz aşamaları Şekil 4.3'de sunulmaktadır.

	<p>1. Aşama: Tünel kazısı öncesi modelin genel görünümü.</p>
	<p>2. Aşama: Çekirdekte deformasyon modülü düşürme katsayısı sağ tüp üstyarı için uygulanmıştır.</p>
	<p>3. Aşama: Sağ tüp üstyarı kazısı ilerlemiş ve destek sistemi tanımlanmıştır.</p>
	<p>4. Aşama: Çekirdekte deformasyon modülü düşürme katsayısı sağ tüp altyarı için uygulanmıştır.</p>
	<p>5. Aşama: Sağ tüp altyarı kazısı ilerlemiş ve destek sistemi tanımlanmıştır.</p>

	<p>6. Aşama: Çekirdekte deformasyon modülü düşürme katsayısı sol tüp üstyarı için uygulanmıştır.</p>
	<p>7. Aşama: Sol tüp üstyarı kazısı ilerlemiş ve destek sistemi tanımlanmıştır.</p>
	<p>8. Aşama: Çekirdekte deformasyon modülü düşürme katsayısı sol tüp altyarı için uygulanmıştır.</p>
	<p>9. Aşama: Sol tüp altyarı kazısı ilerlemiş ve destek sistemi tanımlanmıştır.</p>

Şekil 4.3. Tünel imalat aşamaları için uygulanacak analiz adımları

Gökçebelen Tüneli projesinden seçilen en kesitte yatay gerilmenin düşey gerilmeye oranı olan “k” parametresinin olası değer aralığındaki değişimi ve ikiz tüneller arasındaki mesafenin değişiminin deformasyonlara olan etkisinin değerlendirilmesine ilişkin akım şeması Şekil 4.4.’de görülmektedir.



Şekil 4.4. Tez kapsamında izlenen sayısal modelleme akım şeması

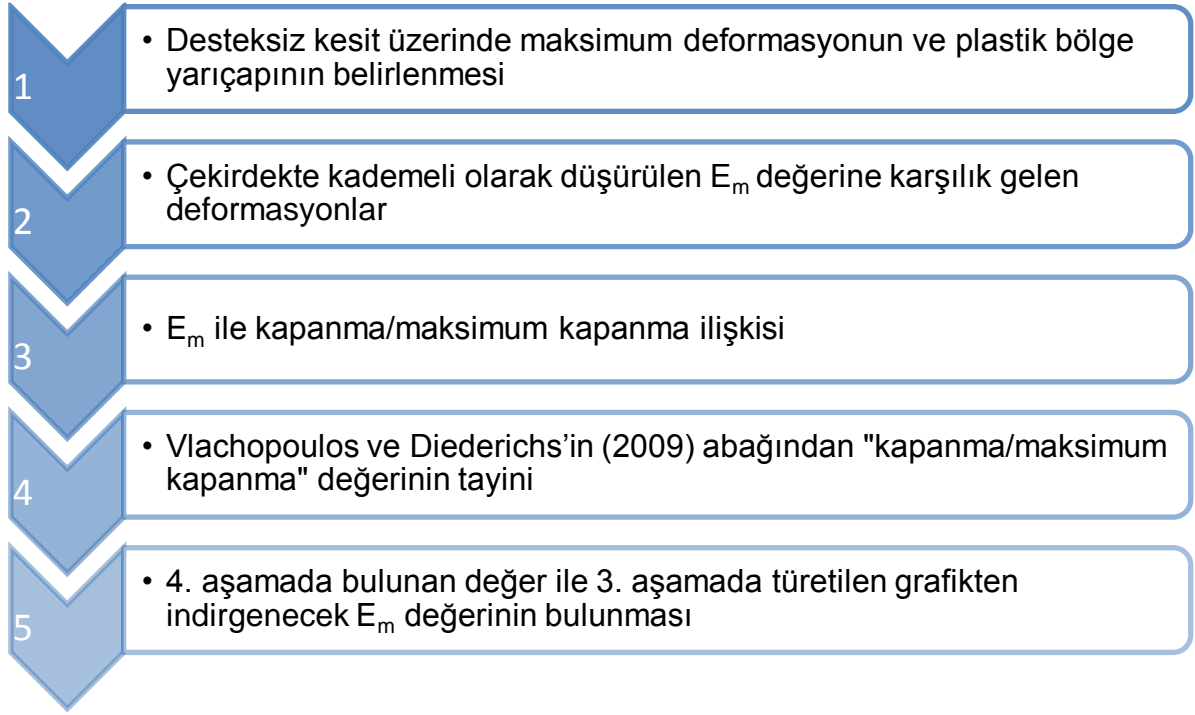
4.1. Sayısal Modelleme ve Analizleri

Kaya kütlesi sınıflama sistemlerinden elde edilen sonuçlara göre tünel gövdesinde yüksek örtünün olduğu bölgeden seçilen Km: 70+155 kesitinde, B2 tip kazı ve destek sistemi önerilmiştir. İmalatın bu bölümünde tünel kazısı hakim birim olan kalkışist birimi içerisinde yapılacak olup, örtü kalınlığı yaklaşık 440 m'dir.

Kalkışist birimi; kahve – koyu gri renkli, yer yer orta derecede genelde az ayrılmış, orta derecede dayanımlı - dayanımlı, az çatlaklı kırıklı yapıdadır. Süreksizlik yüzeyleri düz – az pürüzlü ve kalsit – kuvars damarlıdır.

Yapılan hesaplamalar sonucunda 0.34 ile 0.48 arasında öngörülen “k” katsayısı değer aralığı dikkate alınarak bu değer aralığını kapsayan 0.25, 0.5 ve 0.75 değerleri için “k” katsayısının kademeli olarak değiştirilmesi ve bu değişimin deformasyon ve plastik bölge gelişimi üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

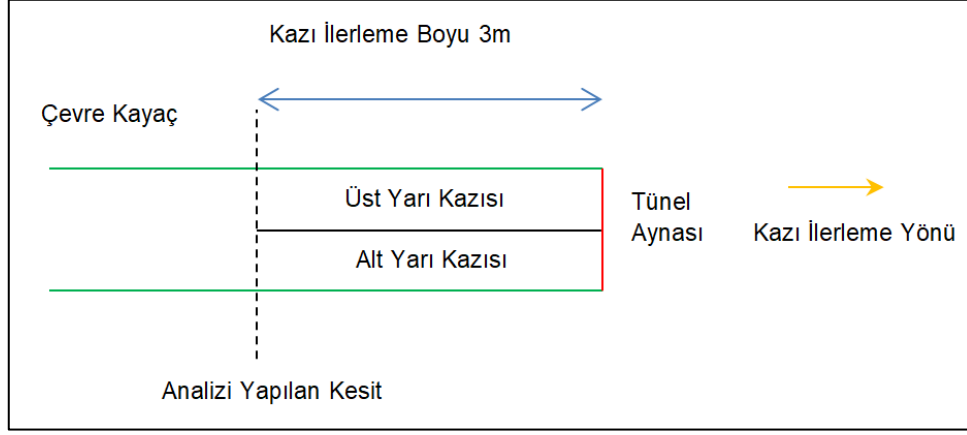
Ancak bu adımdan önce analiz aşamalarında çekirdek kazı bölgelerinde kullanılacak indirgenmiş (material softening) kaya kütlesinin deformasyon modülü tayin edilmiştir. Bu hesaplamalar yatay gerilmenin düşey gerilmeye oranı olan üç farklı “k” parametresi için yapılmıştır. Bu amaçla izlenecek adımlar aşağıda sunulmuştur (Şekil 4.5).



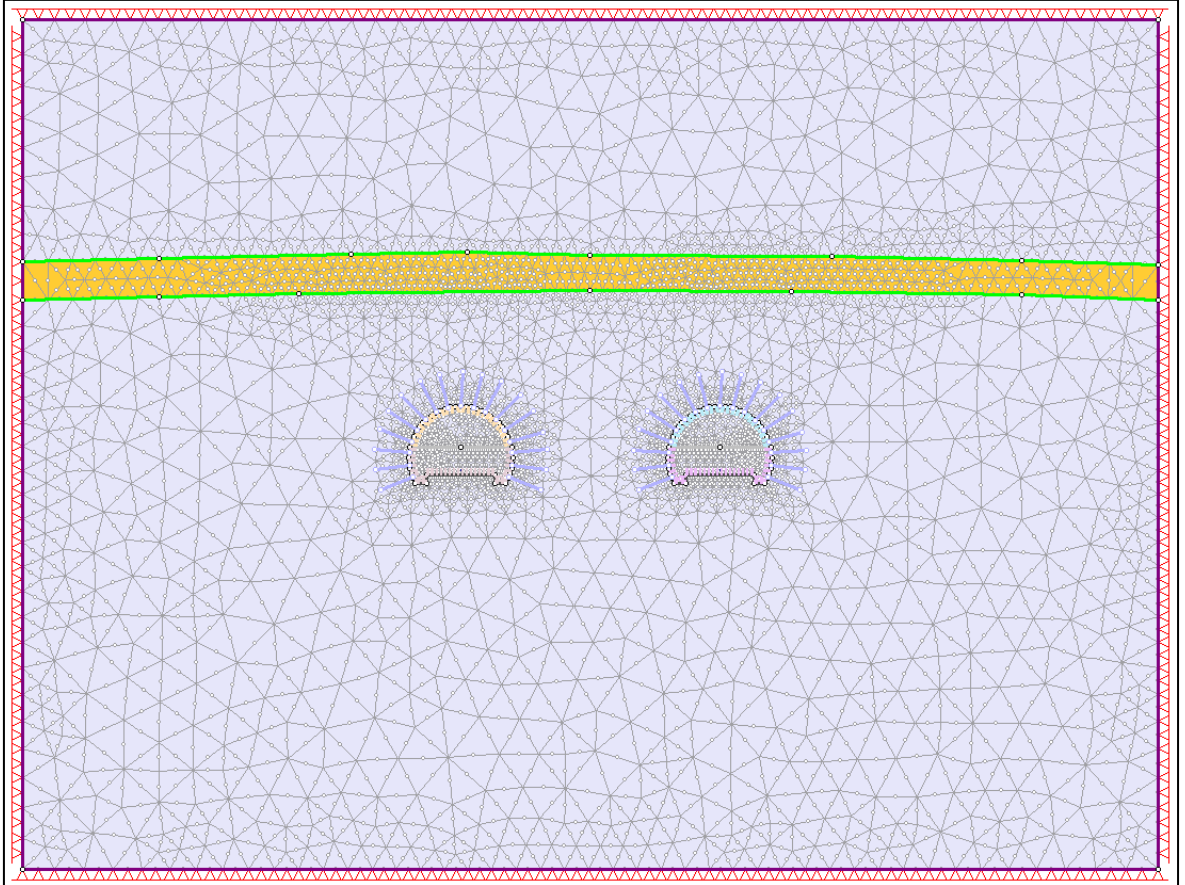
Şekil 4.5. Tünel çekirdek kazı bölgelerinde kullanılacak indirgenmiş (material softening) kaya kütlesinin deformasyon modülünün belirlenmesinde izlenen adımlar

Tünel çekirdek kazı bölgelerinde kullanılacak kaya kütlesi için indirgenmiş elastisite modülü değerinin hesaplanmasında Phase2 programının üreticisi Rocscience firması tarafından yayınlanan RS2 v.9.0 programına ilişkin “3D Tunnel Simulation Using the Core Replacement Technique” isimli dökümandan yararlanılmıştır. Bu yöntem; Phase2 ile yapılan 2 boyutlu analizlerde dikkate alınamayan, 3. boyutun etkisini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Tünelin kazılacak kesimi için (çekirdek), kazı aynasına yaklaşıldığı anda kütle elastisite modülünün maruz kaldığı deformasyondan ötürü azaltılmasına yönelik yaklaşım, ilgili literatürde “Core Replacement Technique” olarak ifade edilmektedir. Tünelin desteksiz bölümünün aynaya olan uzaklığının 3 m olduğu kabul edilmiştir

(Şekil 4.6). Seçilen kesit için hazırlanan sonlu eleman modeli Şekil 4.7’de görülmektedir.



Şekil 4.6. Analizi yapılan kesitin tünel aynasına olan uzaklığı

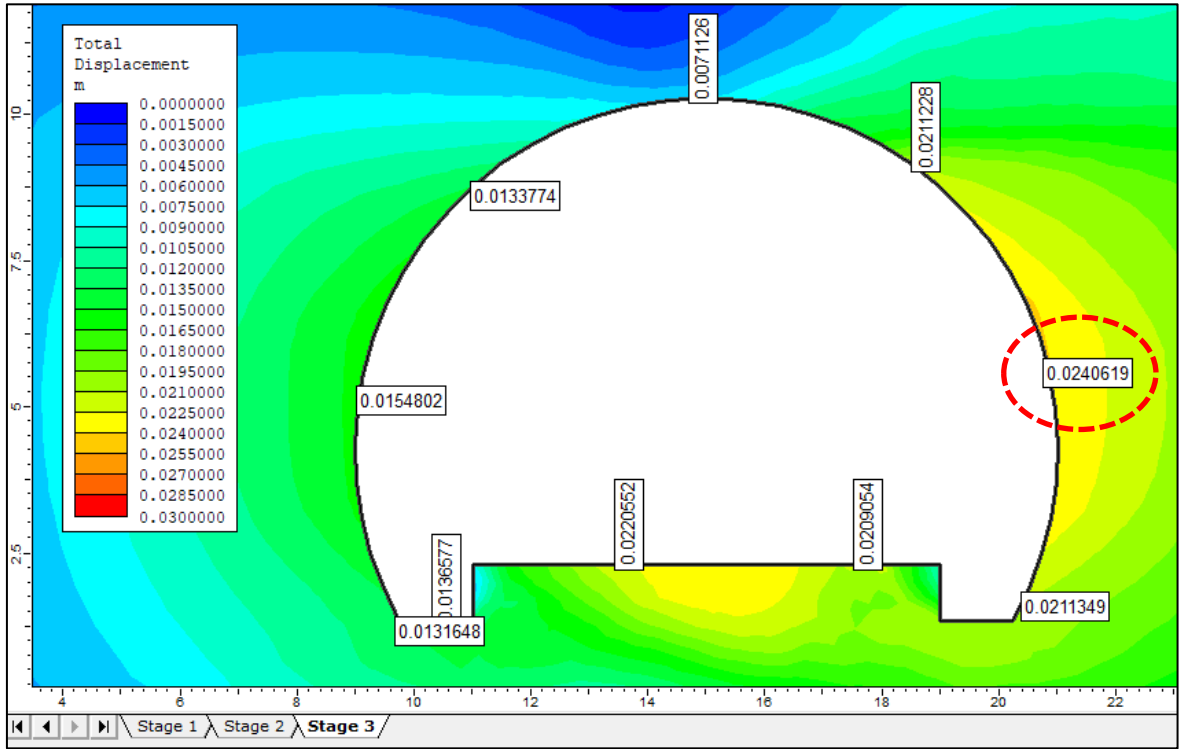


Şekil 4.7. Seçilen en kesit için oluşturulan sonlu elemanlar analiz modeli

İlk aşamada, seçilen her “k” parametresi için kaya kütlelerinin indirgenmiş elastisite modülü bulunmuştur.

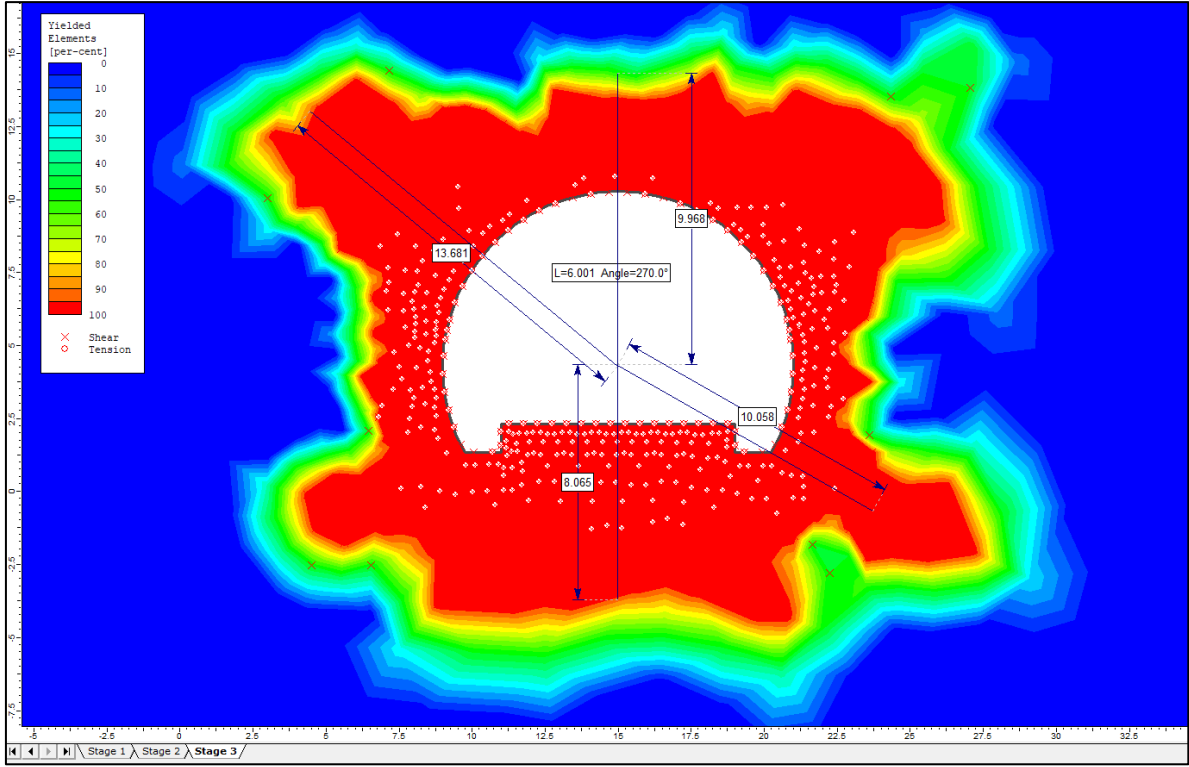
k=0.25 için İndirgenmiş (material softening) Kaya Kütle Deformasyon Modülü Tayini:

Şekil 4.8’de 3 aşamadan oluşan desteksiz analiz üzerindeki deformasyonlar sunulmaktadır. Bu kesitteki en yüksek deformasyon tünelin sağ duvarında 0.024 m olarak bulunmuştur. Bu 3 aşamalı desteksiz analizle belirlenen plastik bölge dağılımı ise Şekil 4.9’de görülmektedir.



Material Name	Color	Initial Element Loading	Elastic Type	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Failure Criterion	Material Type	Intact Compressive Strength (MPa)	mb (peak)	mb (residual)	s (peak)	s (residual)	a (peak)	a (residual)	Dilation Parameter	Piezo Line	Ru
KALKSIST[D=0.0]		Field Stress Only	Isotropic	6380	0.25	Generalized Hoek-Brown	Plastic	63	1.31078	1.31078	0.001019	0.001019	0.51302	0.51302	0	None	0
REK KCT[D=0.0]		Field Stress Only	Isotropic	11920.8	0.25	Generalized Hoek-Brown	Plastic	66	1.56705	1.56705	0.001776	0.001776	0.509269	0.509269	0	None	0

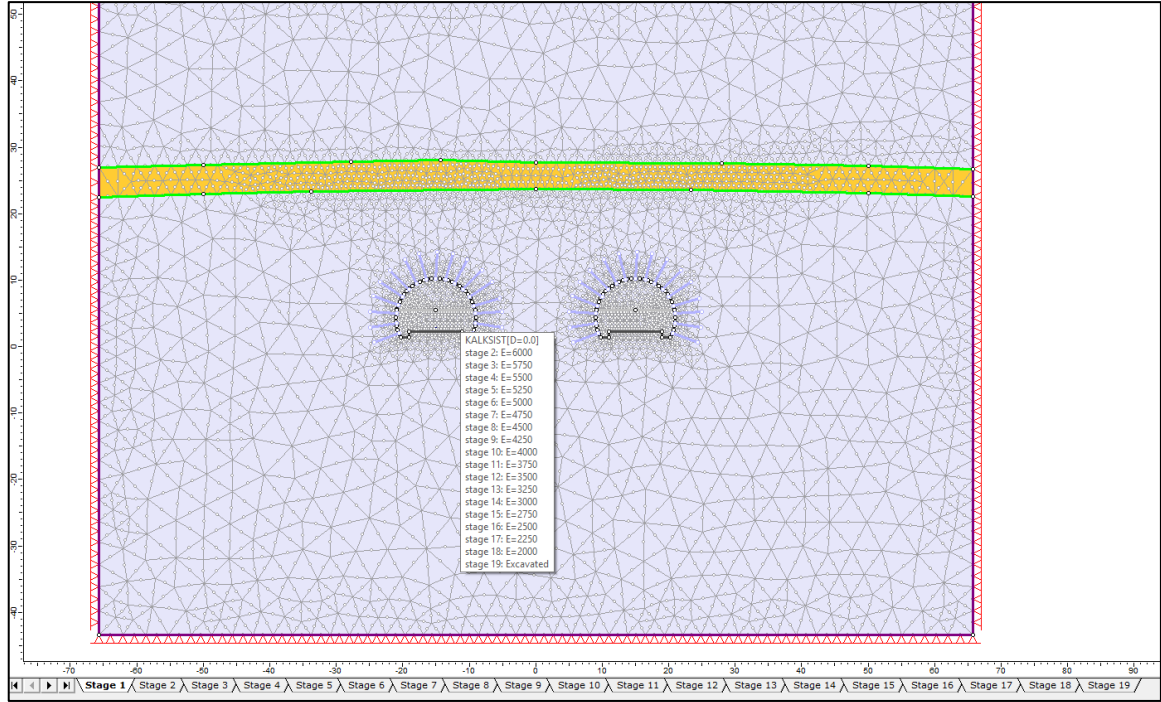
Şekil 4.8. Desteksiz analizde deformasyon dağılımı ve kullanılan tasarım parametreleri (k=0.25)



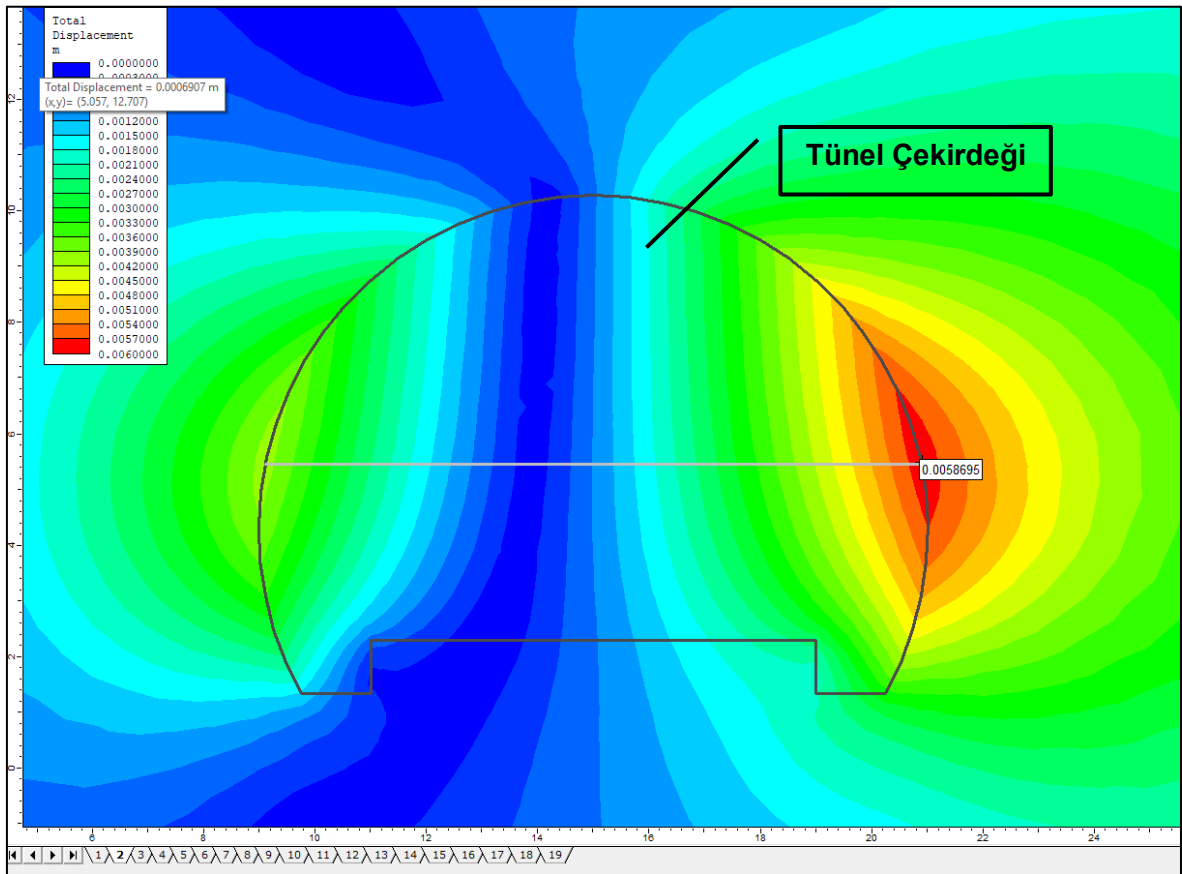
Şekil 4.9. Desteksiz analizde plastik bölge dağılımı ve ortalama yarıçapın belirlenmesi (k=0.25)

Yapılan desteksiz analizlerde plastik bölgenin ortalama yarıçapı alınan 4 farklı ölçüm dikkate alınarak belirlenmiştir. Sonuç olarak k=0.25 için plastik bölge yarıçapı 10.4 m olarak bulunmuştur (bkz. Şekil 4.9).

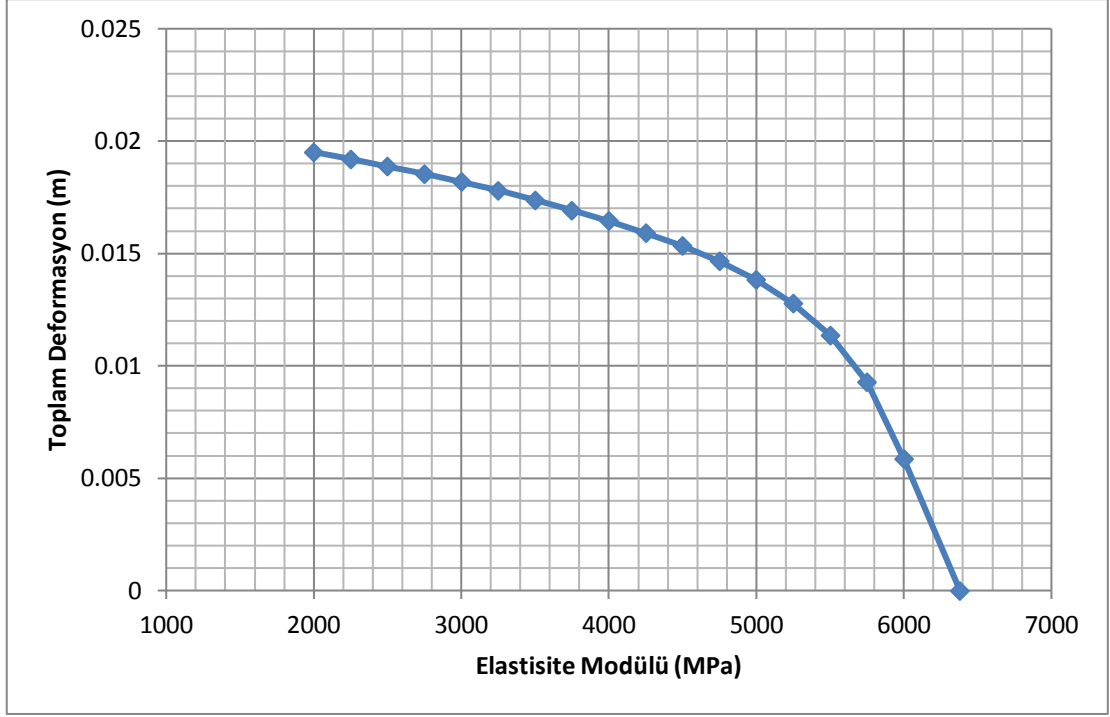
Bir sonraki aşamada ise laboratuvar ve literatür yaklaşımlarıyla bulunan kaya kütlesi deformasyon modülü değeri dikkate alınarak seçilen ilk E_m değerinden itibaren, tünelin çekirdeğindeki kütle deformasyon modülü kademeli olarak azaltılmış olup, her elastisite modülüne karşılık gelen deformasyon değerleri tayin edilmiş ve grafik üzerinde gösterilmiştir (Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13). Ampirik yöntemlerle bulunan kaya kütlesinin elastisite modülü Şekil 4.10'da da sunulan analizde ilk değer olarak (kademeli indirgemedeki aşama 1'de) kullanılmış olup, devam eden her bir aşamada tünel çekirdeğindeki elastisite modülü 250 MPa azaltılmıştır. Uygulanan bu bir dizi analiz sonucunda, ikiz tünellerin çekirdeğindeki kazılacak kütleyle ilişkin farklı elastisite modülü değerlerine karşılık deformasyon değerleri belirlenmiştir.



Şekil 4.10. Çekirdekte kademeli olarak azaltılan E_m değerleri için analiz modeli ve aşamalar

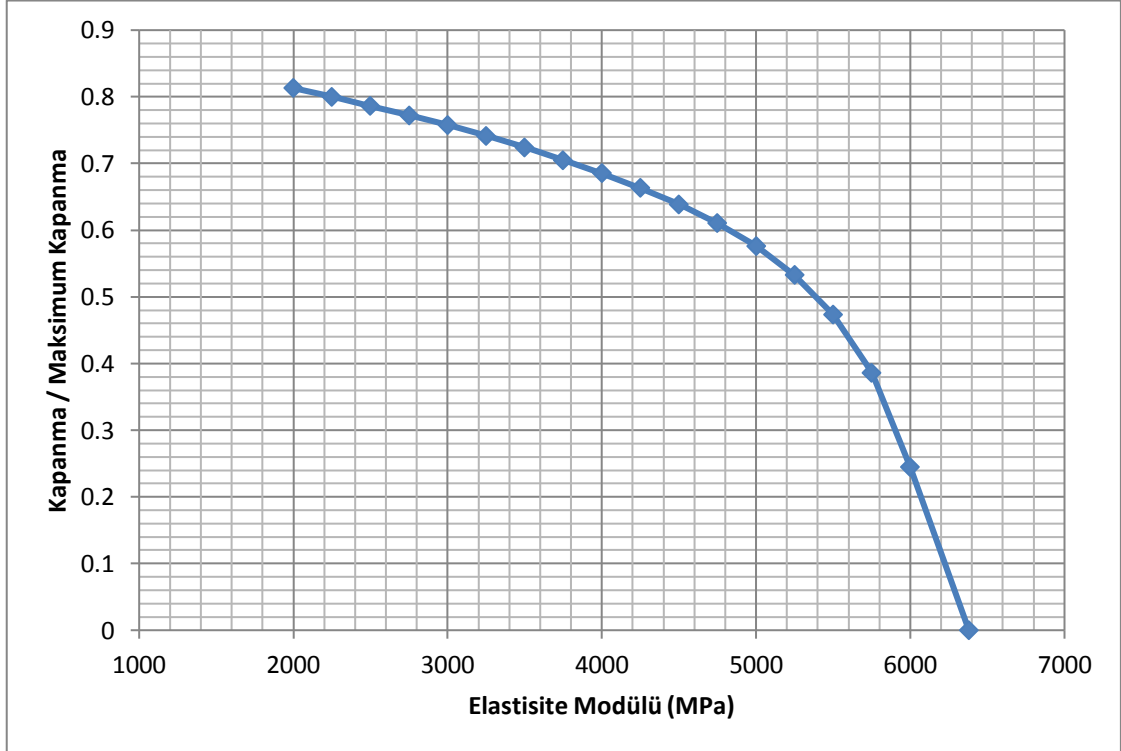


Şekil 4.11. E_m değerinin 6 GPa olduğu aşamadaki deformasyon değeri ($k=0.25$)

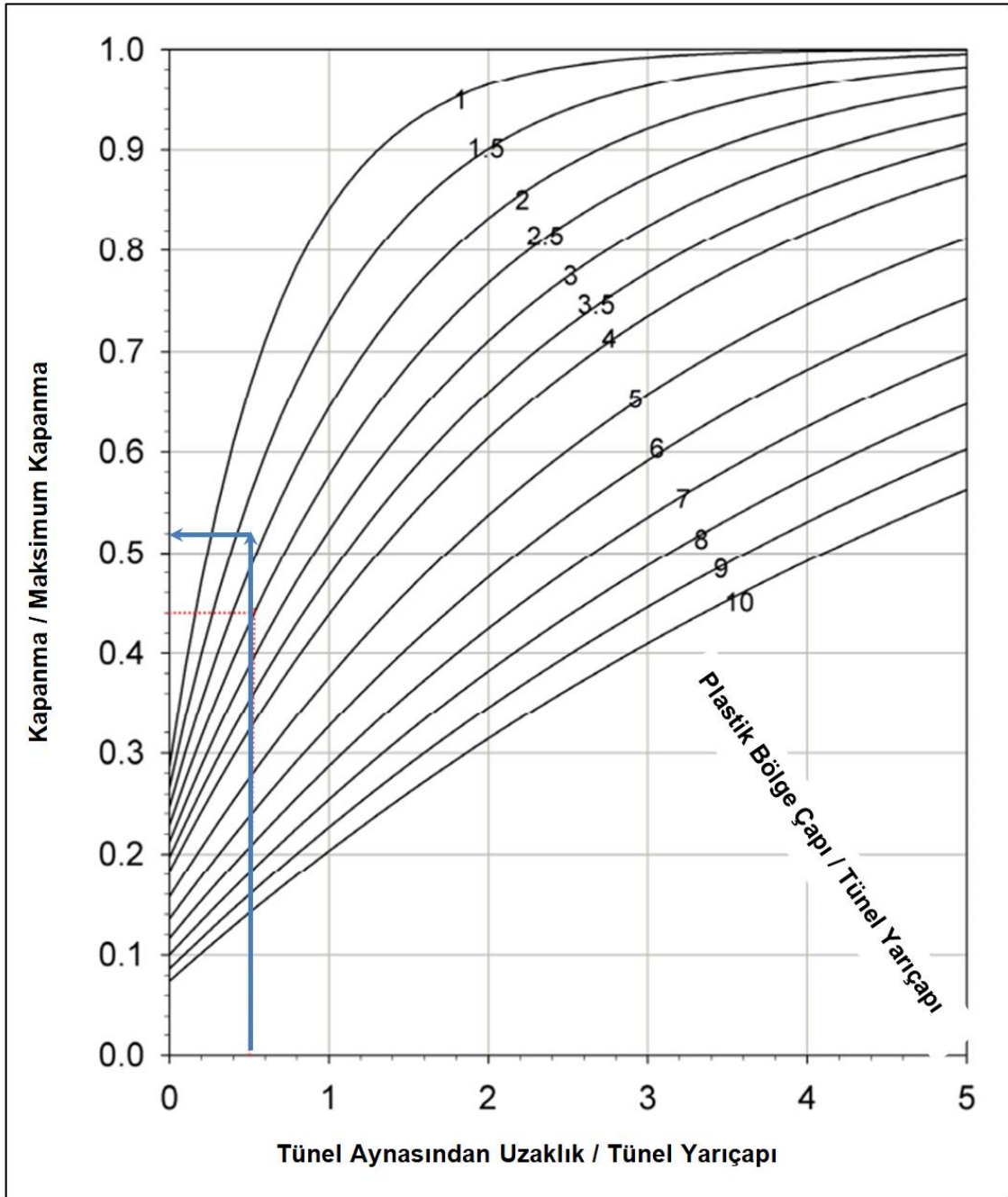


Şekil 4.12. Kademeli olarak azaltılan E_m değerlerine karşılık gelen deformasyonlar ($k=0.25$)

Şekil 4.12’de sunulan grafik, desteksiz kesitte bulunan deformasyon değerinin de dikkate alınmasıyla birlikte “y” ekseninde “kapanma / maksimum kapanma” olacak şekilde modifiye edilmiştir (Şekil 4.13).



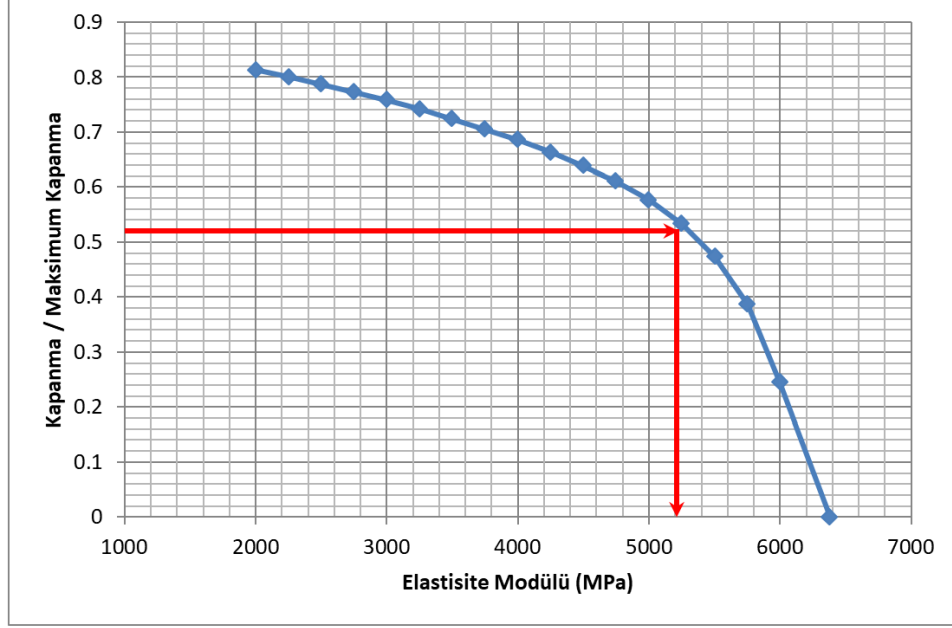
Şekil 4.13. Kapanma / maksimum kapanma ile E_m arasındaki ilişki ($k=0.25$)



Şekil 4.14. Vlachopoulos ve Diederichs'in [44] abağı üzerinde destek deformasyonun belirlenmesi ($k=0.25$)

- Plastik bölge yarıçapı: 10.4 m
- Tünel yarıçapı: 6.0 m
- Tünel aynasından uzaklık: 3.0 m (kazı ilerleme boyu)
- Plastik bölge çapı / tünel yarıçapı: $10.4 / 6.0 = 1.73$
- Kapanma / maksimum kapanma: 0.52 olarak bulunmuştur.

$k=0.25$ için yapılan indirgeme analizlerinde kapanma / maksimum kapanma değeri olan 0.52'nin karşılık geldiği elastisite modülü değeri Şekil 4.15'de bulunmuştur. Sonuç olarak, $k=0.25$ değerinin dikkate alınacağı analizlerde, tünel çekirdeğindeki girdi parametresi olarak kullanılacak indirgenmiş kaya kütlelerinin deformasyon modülü 0.52 için $E_m=5200$ MPa olarak bulunmuştur (bkz. Şekil 4.15).

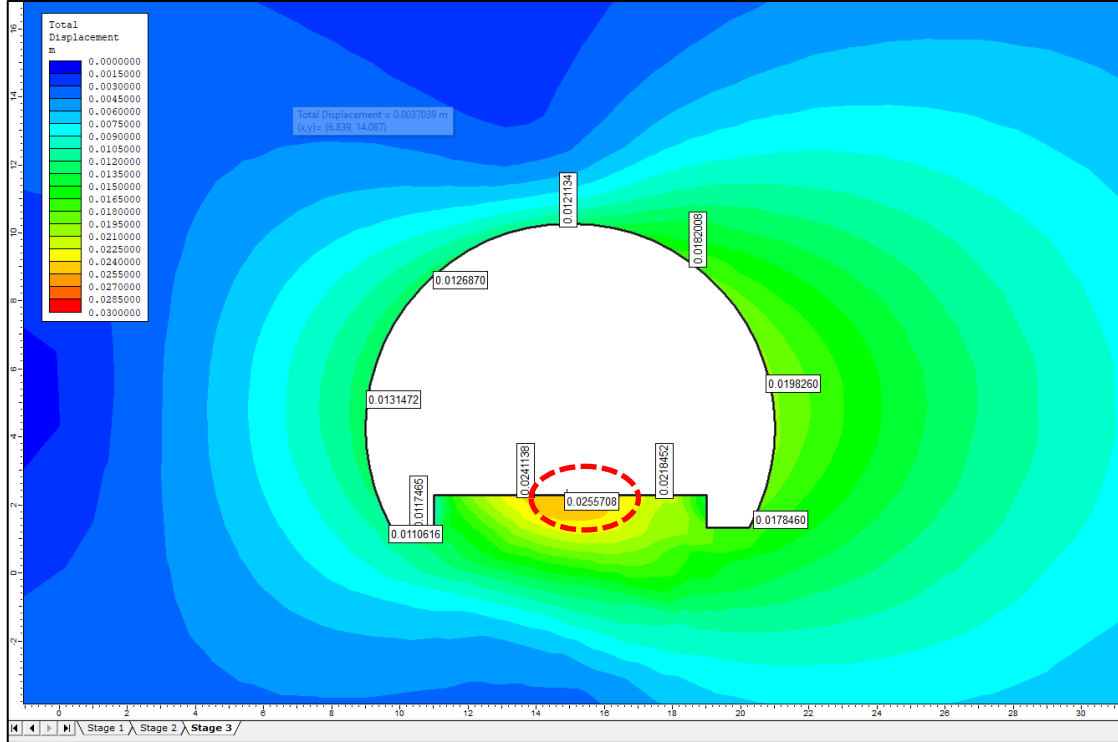


Şekil 4.15. Kapanma / maksimum kapanma ile E_m arasındaki ilişki ($k=0.25$)

k=0.50 için İndirgenmiş (material softening) Kaya Kütle Deformasyon Modülü

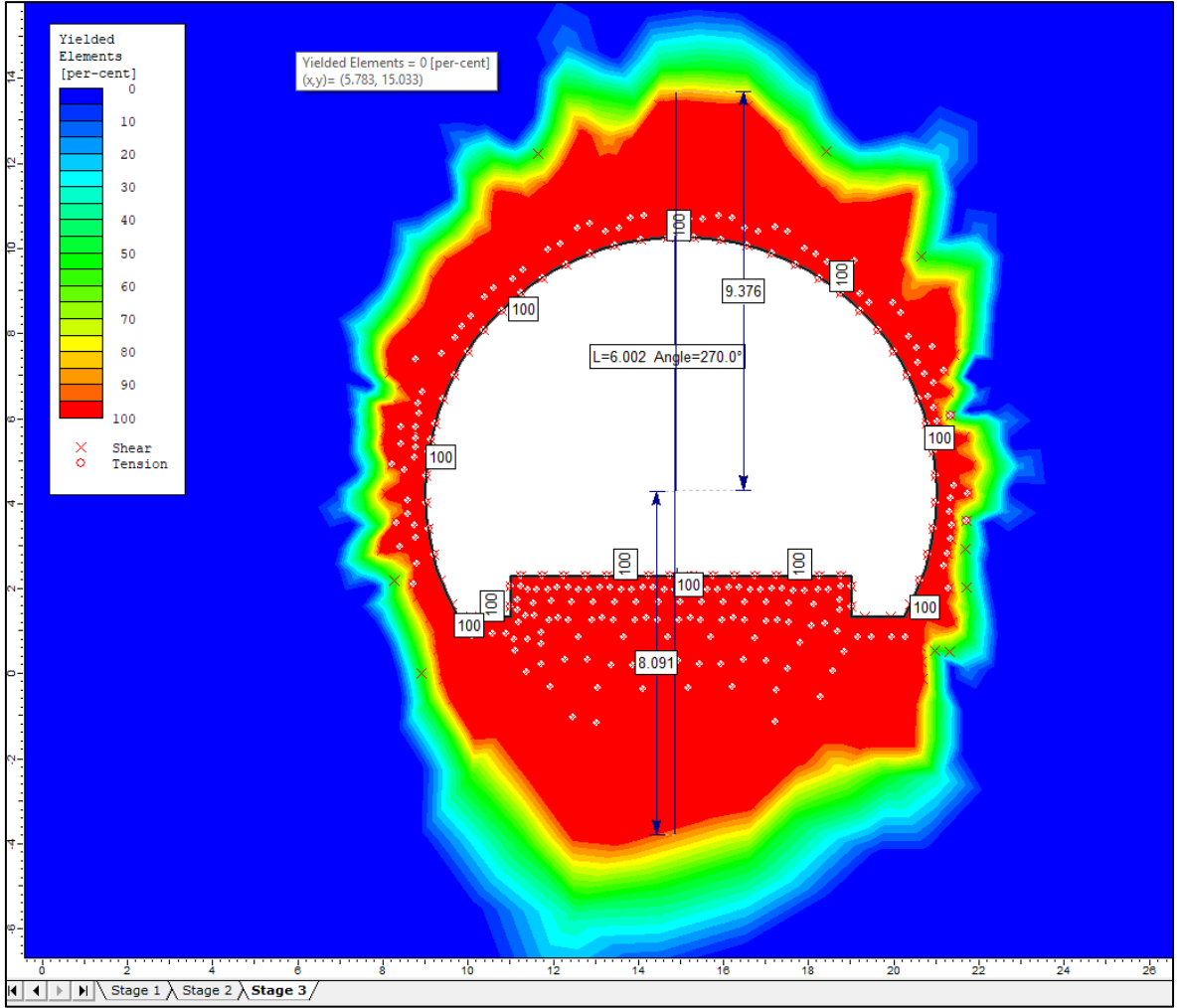
Tayini:

Bir önceki $k=0.25$ için uygulanan prosedür kullanılarak $k=0.50$ için tünel çekirdek kazı bölgesindeki indirgenmiş elastisite modülü belirlenmiştir.



Şekil 4.16. E_m değerinin 6 GPa olduğu aşamadaki deformasyon değeri ($k=0.50$)

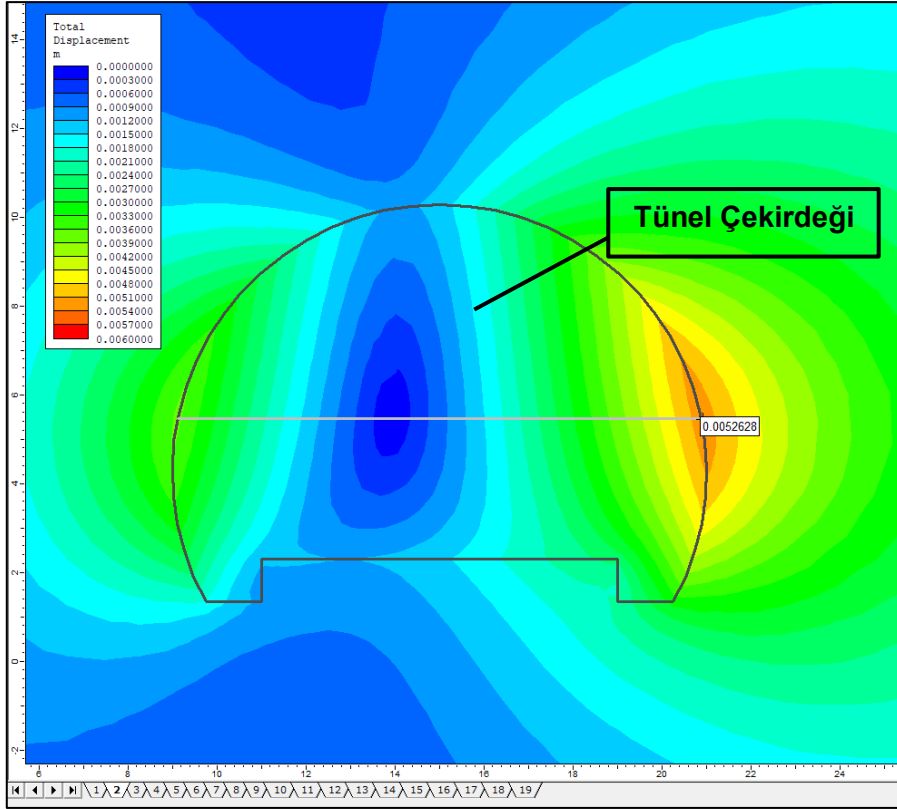
$K=0.50$ için desteksiz yapılan analizde maksimum deformasyon 0.026 m olarak bulunmuştur (bkz. Şekil 4.16). Desteksiz analizde bulunan plastik bölge ortalama yarıçapı ise 8.7 m olarak belirlenmiştir (Şekil 4.17).



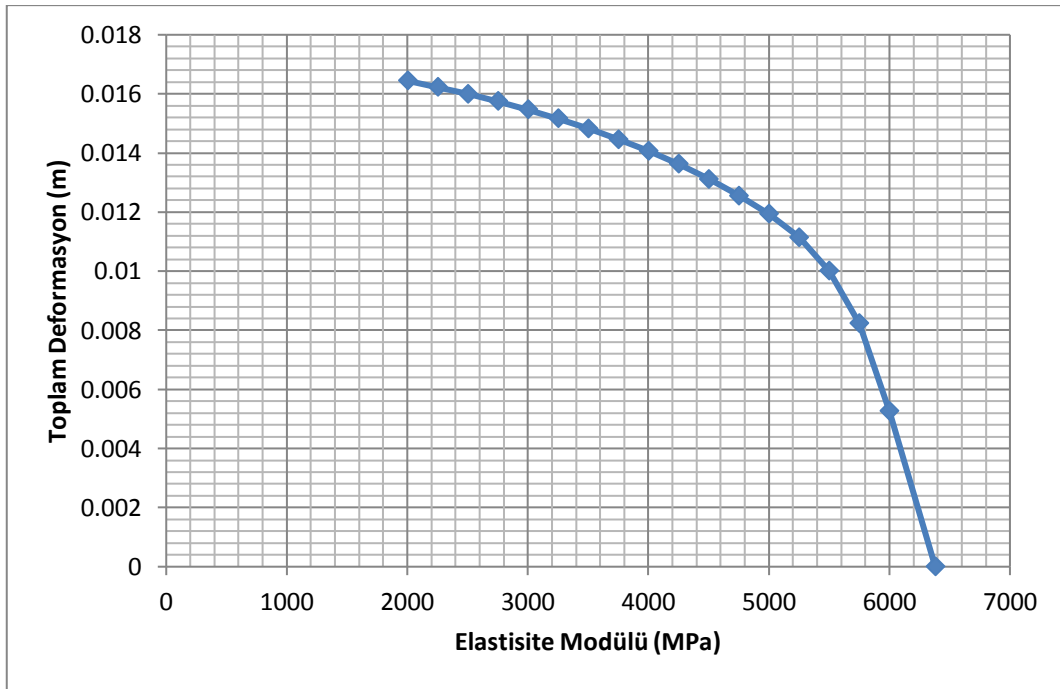
Şekil 4.17. Desteksiz analizde plastik bölge dağılımı ve ortalama yarıçapın belirlenmesi (k=0.50)

Tünel çekirdeğine ait kaya kütesinin deformasyon modülünün kademeli olarak düşürülmesi ile oluşturulan sayısal arazi modeli sonuçlarından ilk aşamadaki deformasyon Şekil 4.18’de sunulmuştur. Desteksiz analizde ilk aşamada bulunan maksimum kapanma 0.005 m’dir.

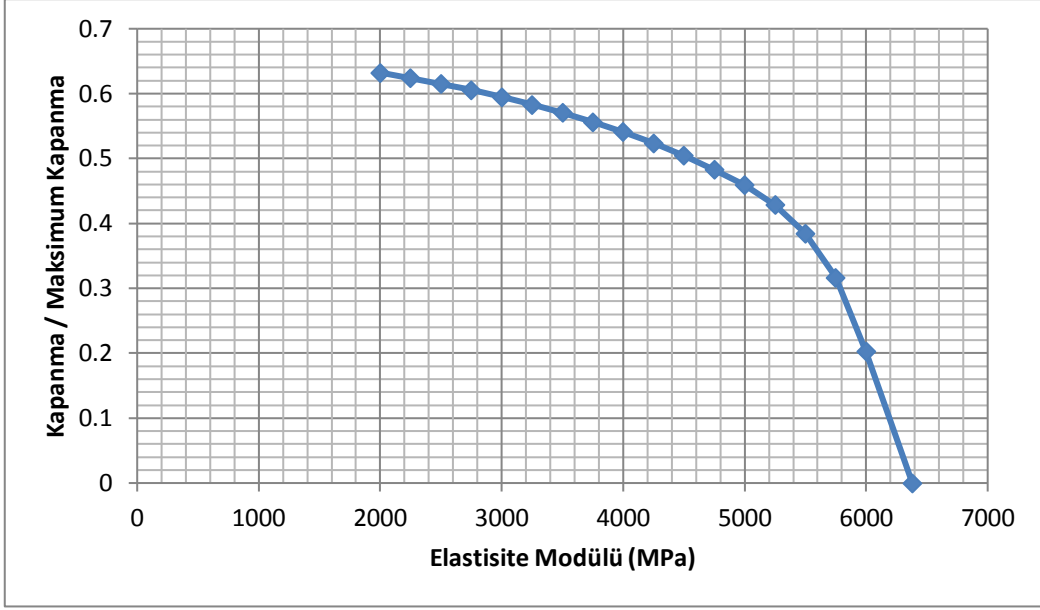
Kademeli olarak indirgenen elastisite modülüne karşılık elde edilen deformasyon miktarları kullanılarak, Şekil 4.19’da sunulan grafik elde edilmiştir. Şekil 4.19’da sunulan grafik, desteksiz kesitte bulunan deformasyon değerinin de dikkate alınmasıyla birlikte “y” ekseninde “kapanma / maksimum kapanma” olacak şekilde modifiye edilmiştir (Şekil 4.20).



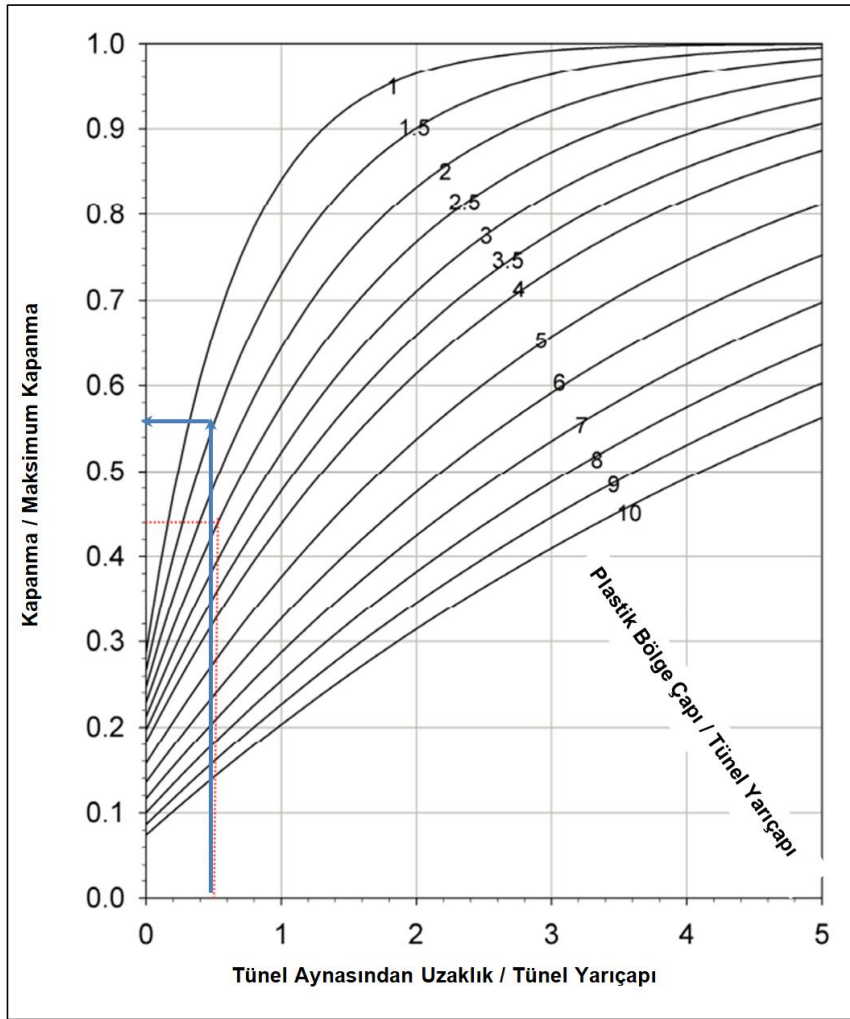
Şekil 4.18. E_m değerinin 6 GPa olduğu aşamadaki deformasyon değeri ($k=0.50$)



Şekil 4.19. Kademeli olarak azaltılan E_m değerlerine karşılık gelen deformasyonlar ($k=0.50$)



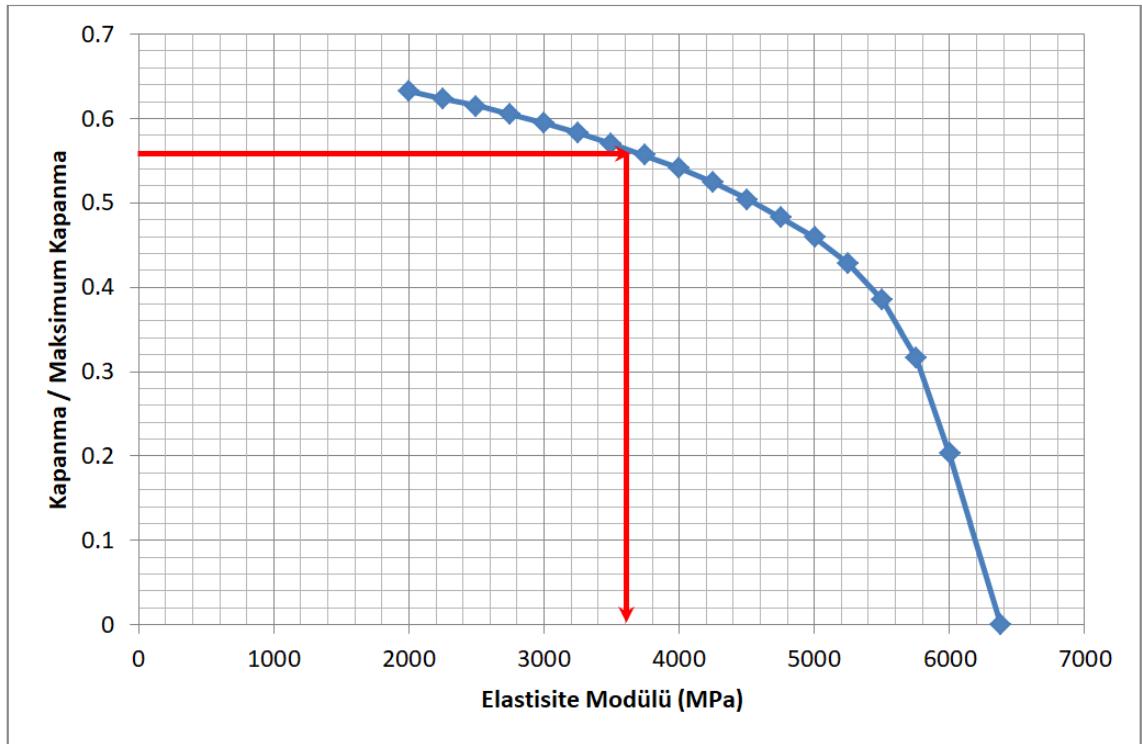
Şekil 4.20. Kapanma / maksimum kapanma ile E_m arasındaki ilişki ($k=0.50$)



Şekil 4.21. Vlachopoulos ve Diederichs'in [44] abağı üzerinde deformasyonun belirlenmesi ($k=0.50$)

- Plastik bölge yarıçapı: 8.7 m
- Tünel yarıçapı: 6.0 m
- Tünel aynasından uzaklık: 3.0 m
- Plastik bölge çapı / tünel yarıçapı: $8.7 / 6.0 = 1.45$
- Kapanma / maksimum kapanma: 0.56 olarak bulunmuştur.

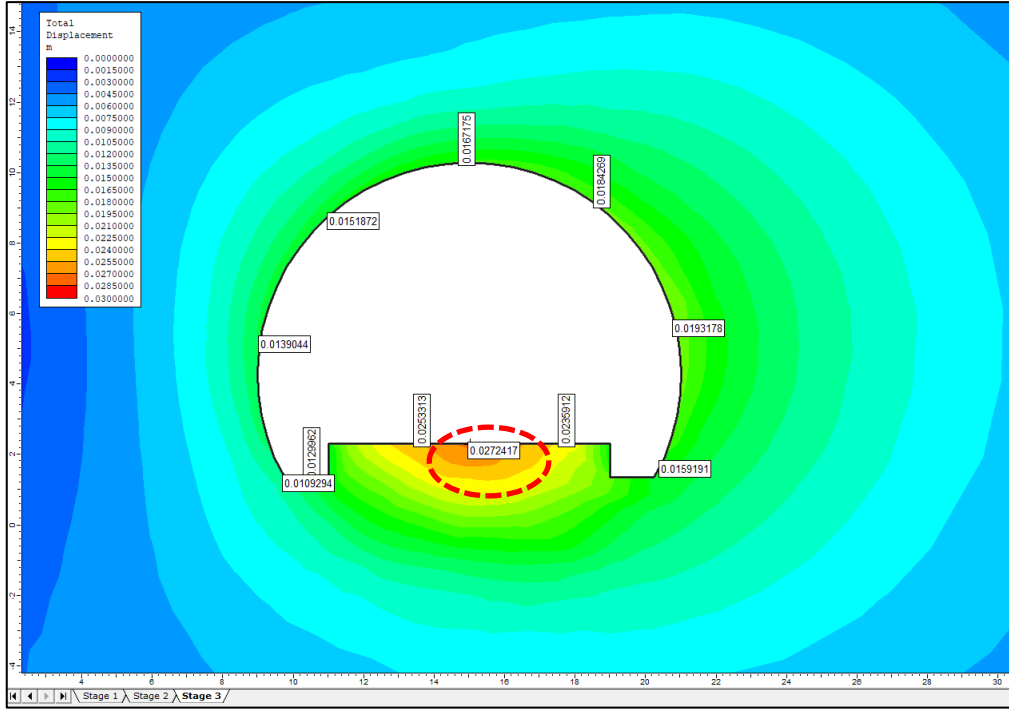
$k=0.50$ değerinin dikkate alınacağı analizlerde tünel çekirdeğinde girdi parametresi olarak kullanılacak indirgenmiş kaya kütlelerinin deformasyon modülü ise 0.56 değeri için $E_m=3600$ MPa olarak bulunmuştur (Şekil 4.22).



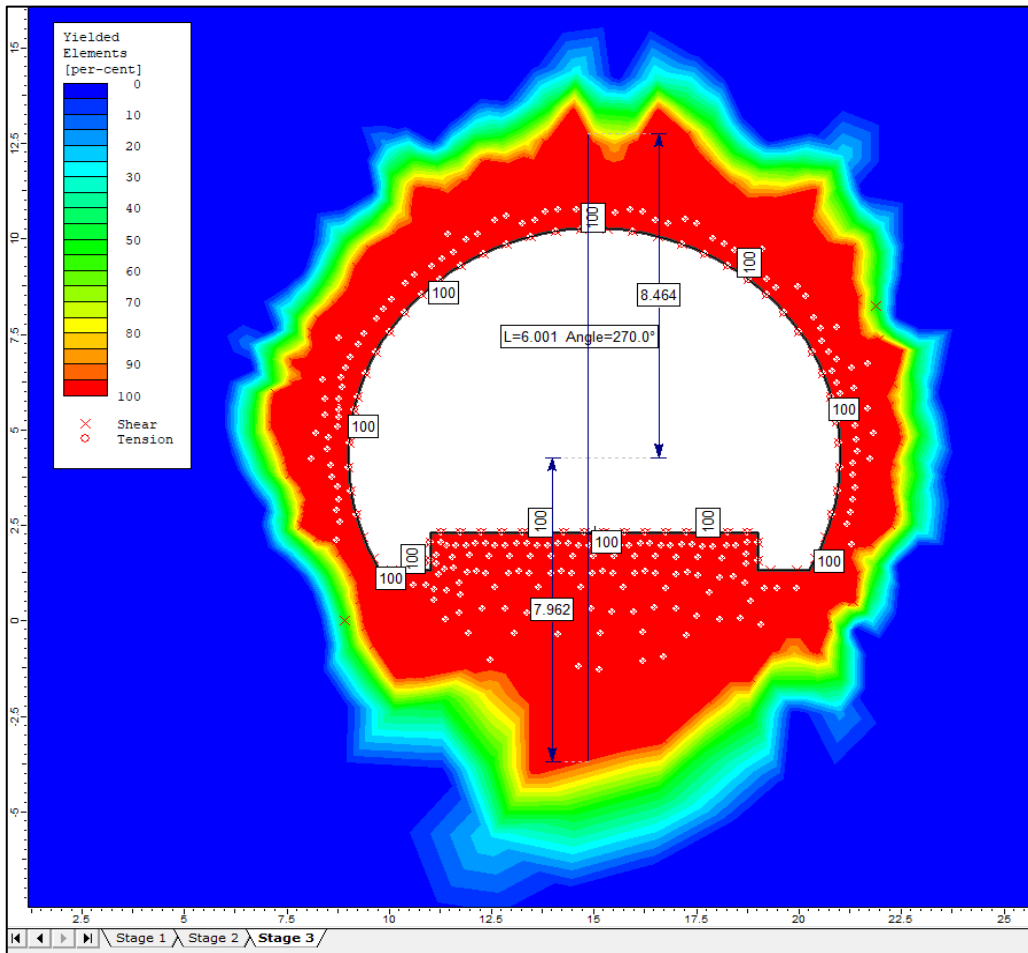
Şekil 4.22. Kapanma / maksimum kapanma ile E_m arasındaki ilişki ($k=0.50$)

$k=0.75$ için İndirgenmiş (material softening) Kaya Kütle Deformasyon Modülü Tayini:

$k=0.25$ ve $k=0.50$ için uygulanan prosedür kullanılarak $k=0.70$ için tünel çekirdek kazı bölgesindeki indirgenmiş elastisite modülü belirlenmiştir (Şekil 4.23 – Şekil 4.29). $k=0.75$ için desteksiz yapılan analizde maksimum deformasyon 0.027 m olarak bulunmuştur (Şekil 4.23). Desteksiz analizde bulunan plastik bölge ortalama yarıçapı ise 8.2 m olarak belirlenmiştir

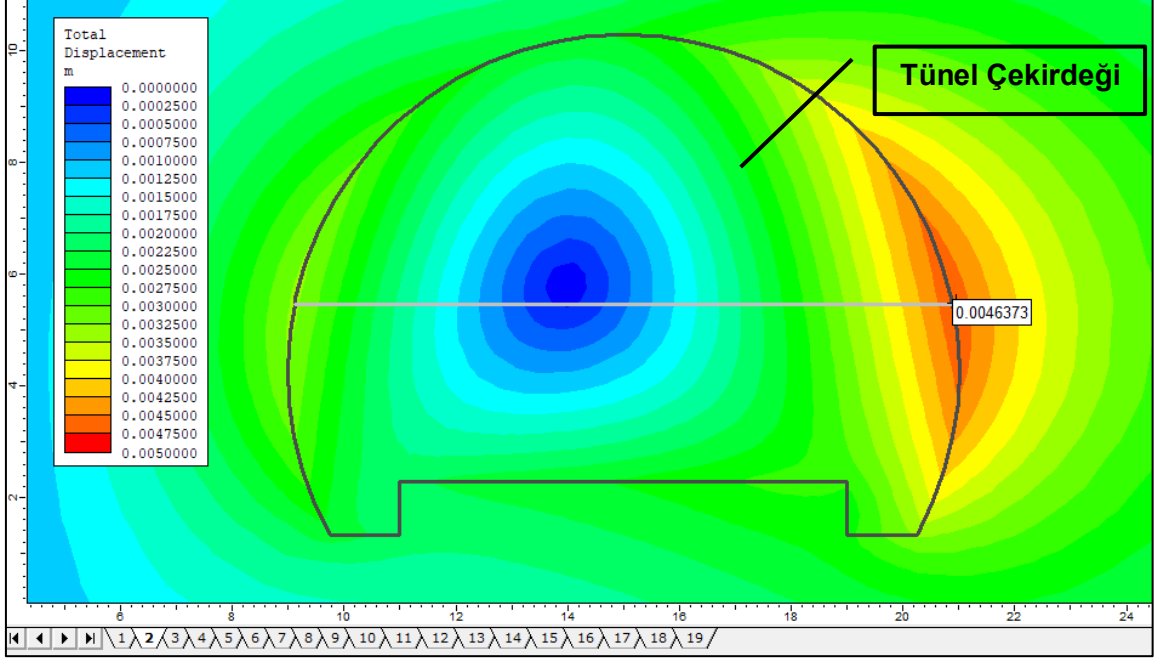


Şekil 4.23. E_m değerinin 6 GPa olduğu aşamadaki deformasyon değeri ($k=0.75$)

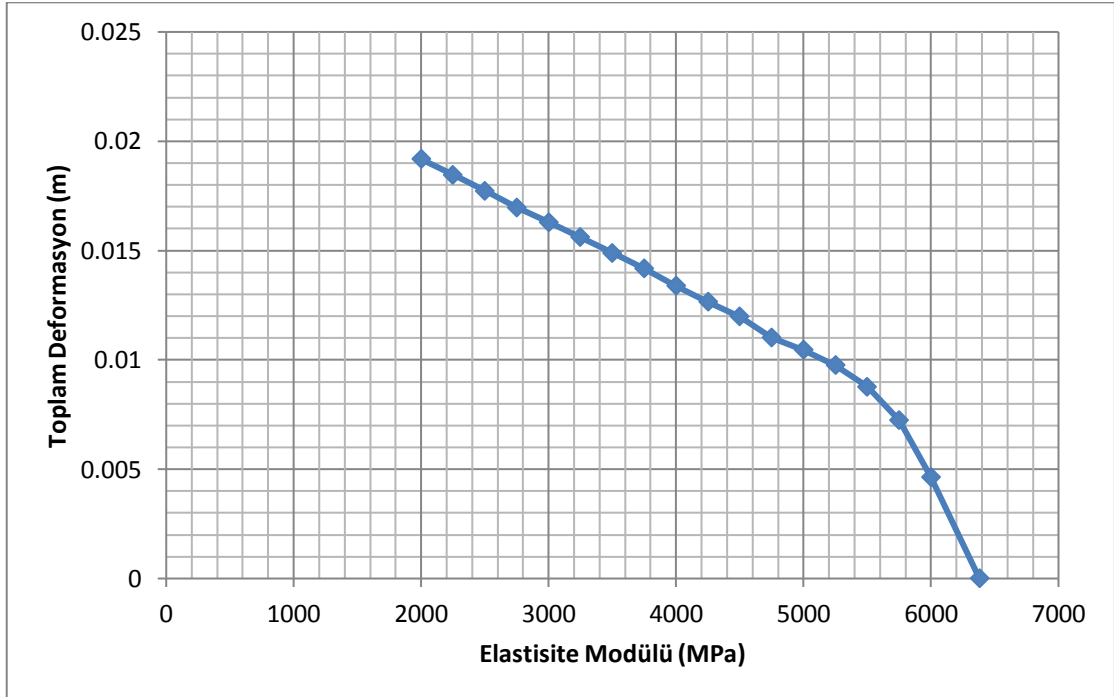


Şekil 4.24. Desteksiz analizde plastik bölge dağılımı ve ortalama yarıçapın belirlenmesi ($k=0.75$)

$k=0.75$ için yapılan tünel çekirdeğindeki kaya kütesinin deformasyon modülünün kademeli olarak düşürülmesi ile oluşturulan sayısal model analiz sonuçlarından ilk aşamadaki deformasyon Şekil 4.25'de sunulmuştur. Kademeli olarak azaltılan E_m değerlerine karşılık gelen deformasyonlar ise Şekil 4.26'de grafiksel olarak sunulmuştur.

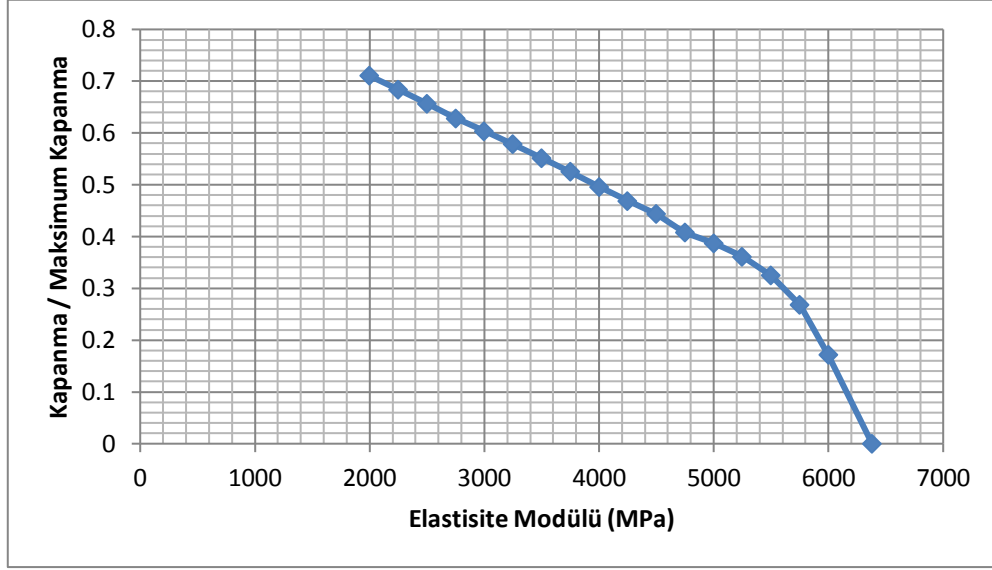


Şekil 4.25. E_m değerinin 6 GPa olduğu aşamadaki deformasyon değeri ($k=0.75$)

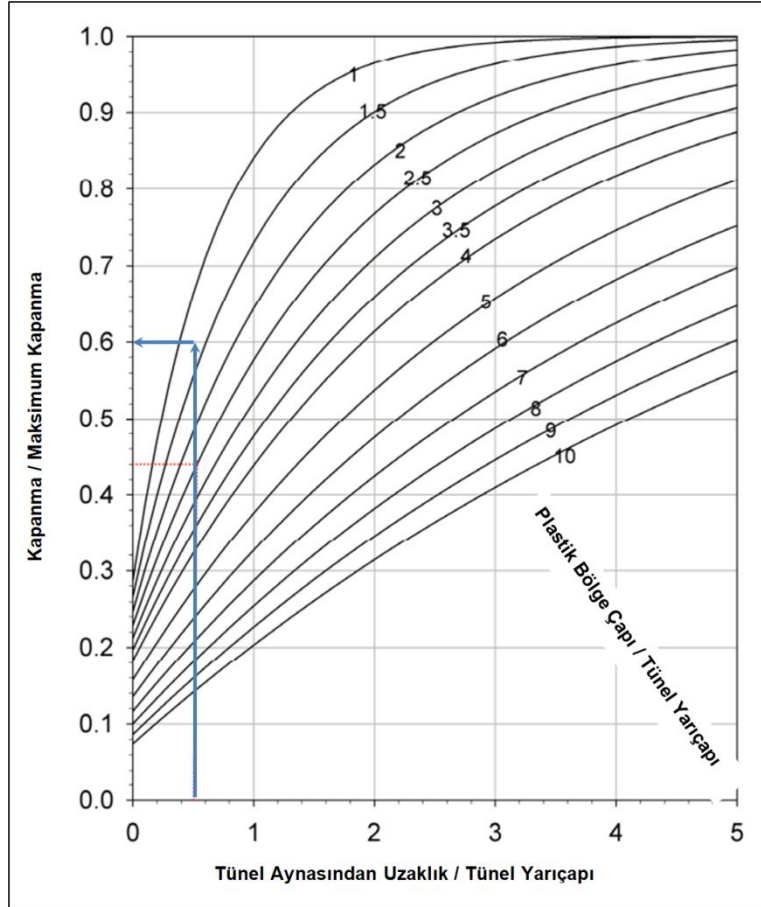


Şekil 4.26. Kademeli olarak azaltılan E_m değerlerine karşılık gelen deformasyonlar ($k=0.75$)

Şekil 4.26'da sunulan grafik, desteksiz kesitte bulunan deformasyon değerinin de dikkate alınmasıyla birlikte "y" ekseninde "kapanma / maksimum kapanma" olacak şekilde modifiye edilmiştir (Şekil 4.27).



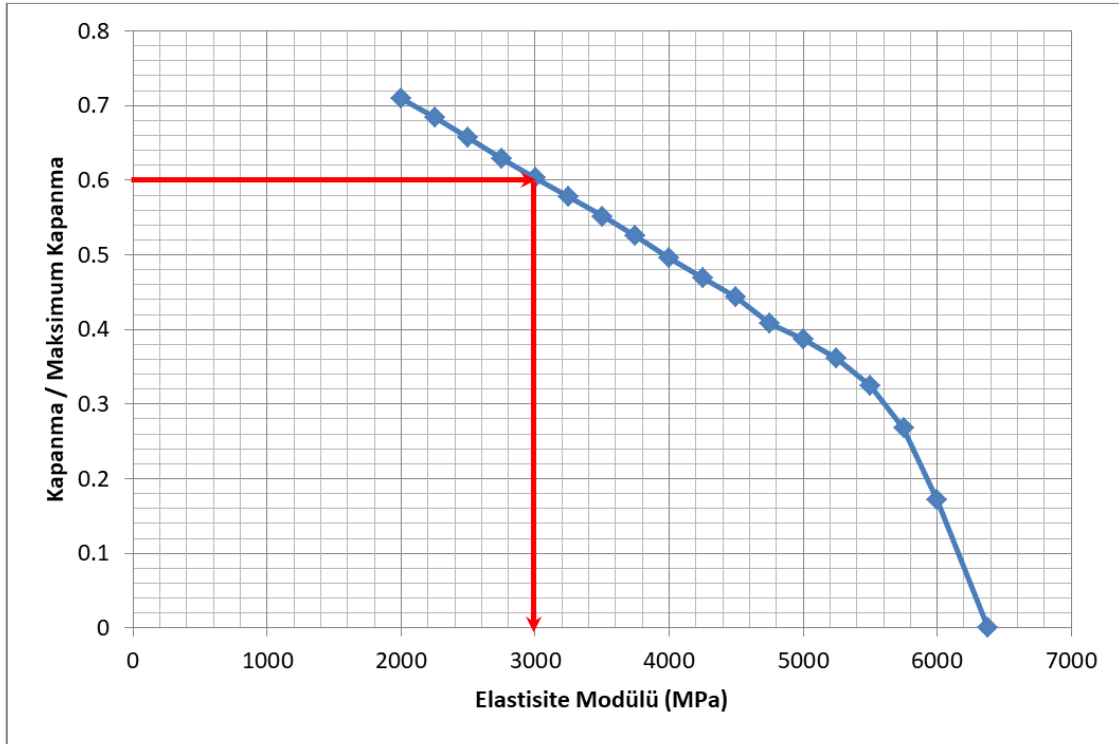
Şekil 4.27. Kapanma / maksimum kapanma ile E_m arasındaki ilişki ($k=0.75$)



Şekil 4.28. Vlachopoulos ve Diederichs'in [44] abağı üzerinde deformasyonun belirlenmesi ($k=0.75$)

- Plastik bölge yarıçapı: 8.2 m
- Tünel yarıçapı: 6.0 m
- Tünel aynasından uzaklık: 3.0 m
- Plastik bölge çapı / tünel yarıçapı: $8.2 / 6.0 = 1.37$
- Kapanma / maksimum kapanma: 0.60 olarak bulunmuştur.

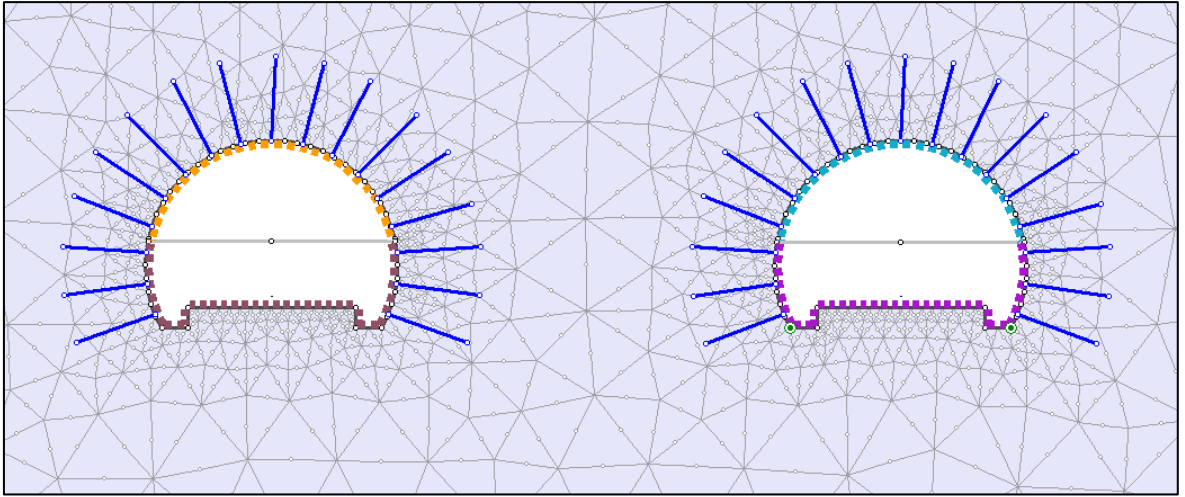
Sonuç olarak, $k=0.75$ değerinin dikkate alınacağı analizlerde tünel çekirdeği için girdi parametresi olarak kullanılacak indirgenmiş kaya kütlelerinin deformasyon modülü $E_m=3000$ MPa olarak bulunmuştur (Şekil 4.29).



Şekil 4.29. Kapanma / maksimum kapanma ile E_m arasındaki ilişki ($k=0.75$)

4.1.1. “k” değerindeki değişimin etkisine yönelik analizler

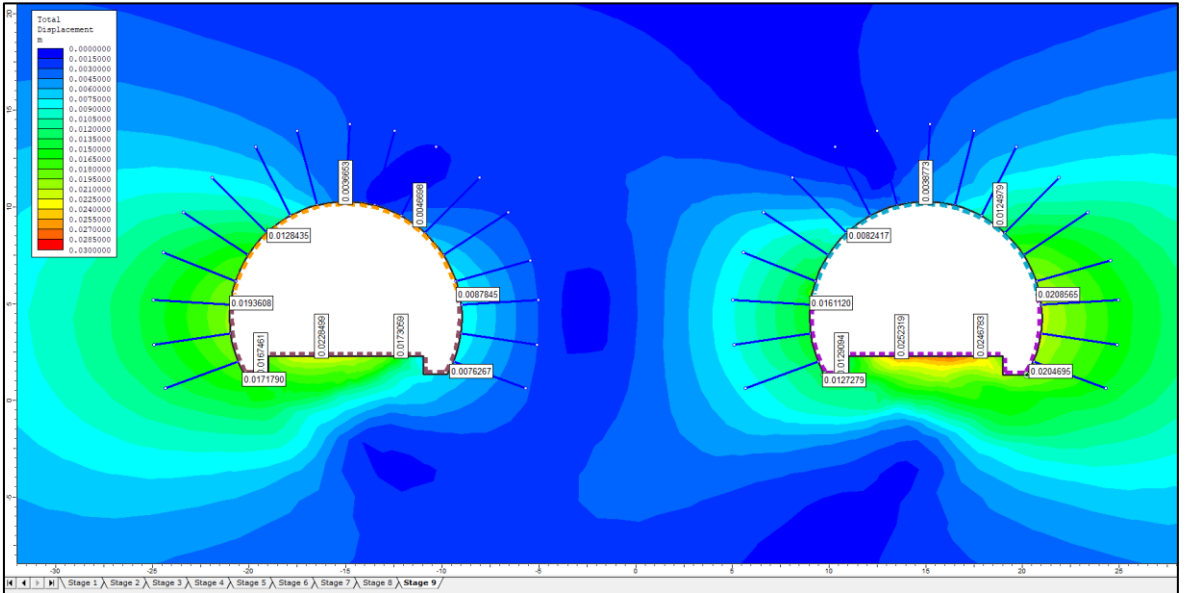
Değişkenlik gösteren “k” parametreleri için azaltılmış kaya kütleleri deformasyon modülünün bulunmasının ardından ikiz tünel için Şekil 4.3’de gösterilen imalat aşamalarıyla $k=0.25$, $k=0.5$ ve $k=0.75$ değerleri için, her birinde çekirdek kazı bölgeleri için belirlenen indirgenmiş elastisite modülü değerleri kullanılarak deformasyon ve plastik bölge analizleri yapılmıştır. Öngörülen tasarım parametreleri ve analizlerde kullanılan sayısal model Şekil 4.30’da sunulmuştur.



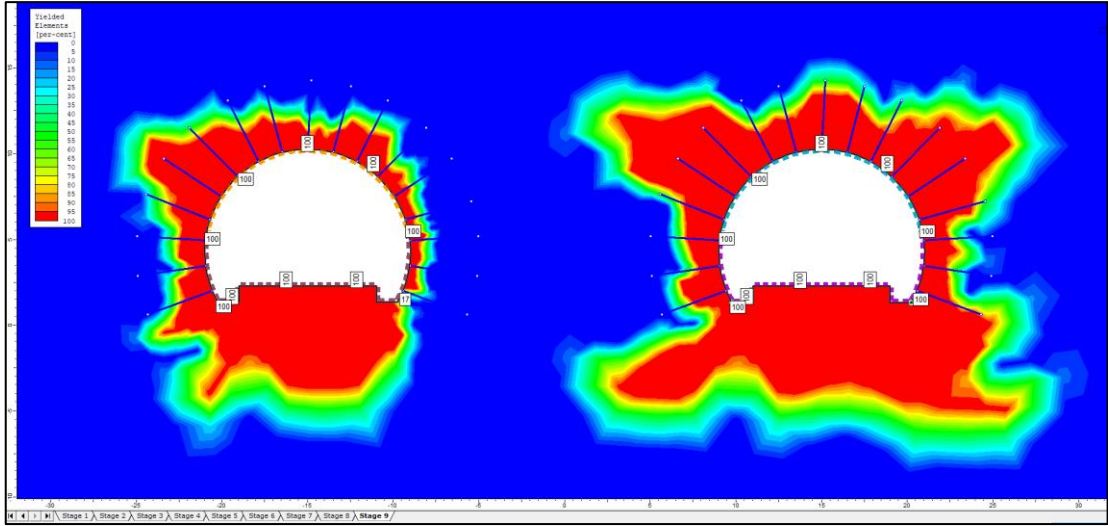
Material Name	Color	Initial Element Loading	Elastic Type	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Failure Criterion	Material Type	Intact Compressive Strength (MPa)	mb (peak)	mb (residual)	s (peak)	s (residual)	a (peak)	a (residual)	Dilation Parameter	Piezo Line	Ru
KALKSIST[D=0.0]		Field Stress Only	Isotropic	6380	0.25	Generalized Hoek-Brown	Plastic	63	1.31078	1.31078	0.001019	0.001019	0.51302	0.51302	0	None	0
KALKSIST[SOFT]		None	Isotropic	5200	0.25	Generalized Hoek-Brown	Plastic	63	1.31078	1.31078	0.001019	0.001019	0.51302	0.51302	0	None	0
REK KCT[D=0.0]		Field Stress Only	Isotropic	11920.8	0.25	Generalized Hoek-Brown	Plastic	66	1.56705	1.56705	0.001776	0.001776	0.509269	0.509269	0	None	0

Şekil 4.30. Sayısal model ve kullanılan tasarım parametreleri

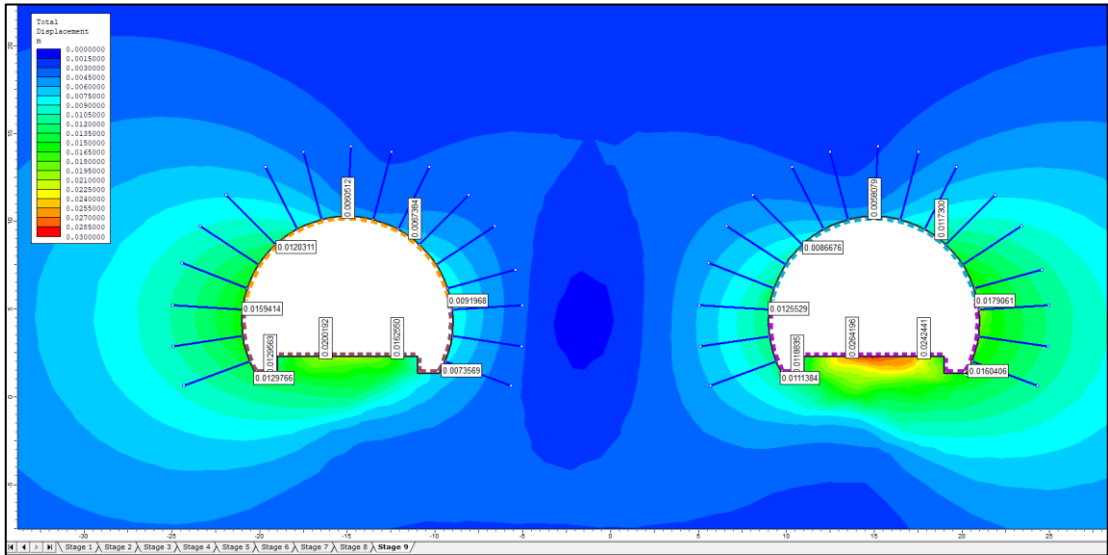
$k=0.25$, $k=0.5$ ve $k=0.75$ için deformasyon dağılımları ve plastik bölge dağılımları Şekil 4.31 ile Şekil 4.36 arasında sunulmuştur.



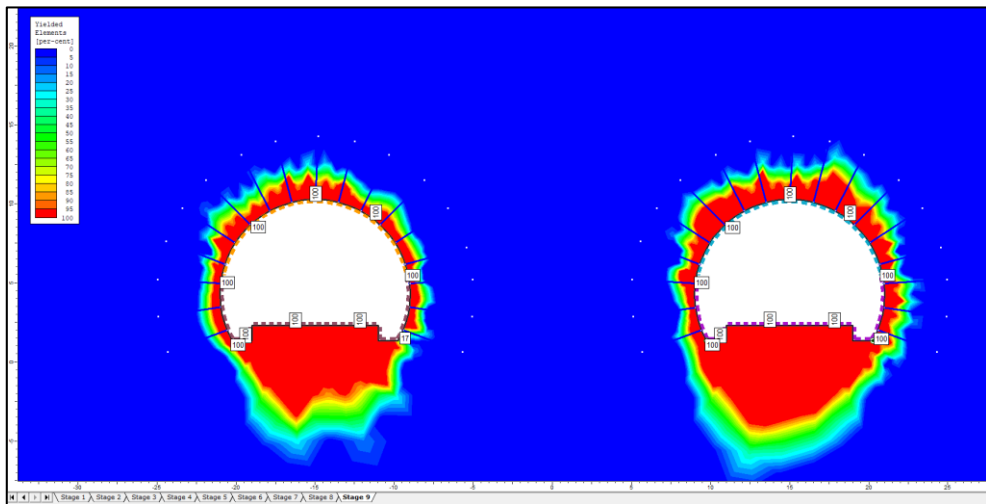
Şekil 4.31. $k=0.25$ için destek sonu toplam deformasyon miktarları



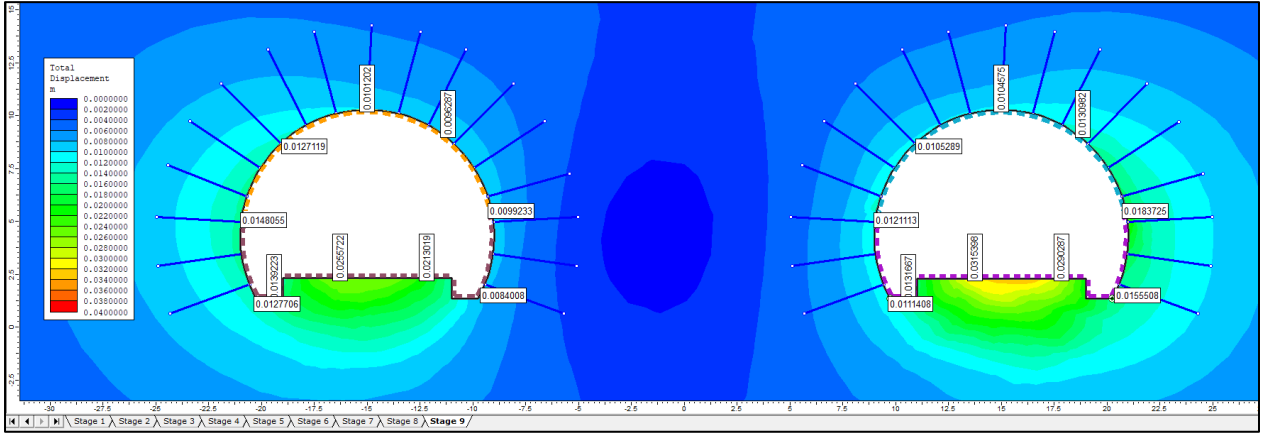
Şekil 4.32. $k=0.25$ için plastik bölge analizi



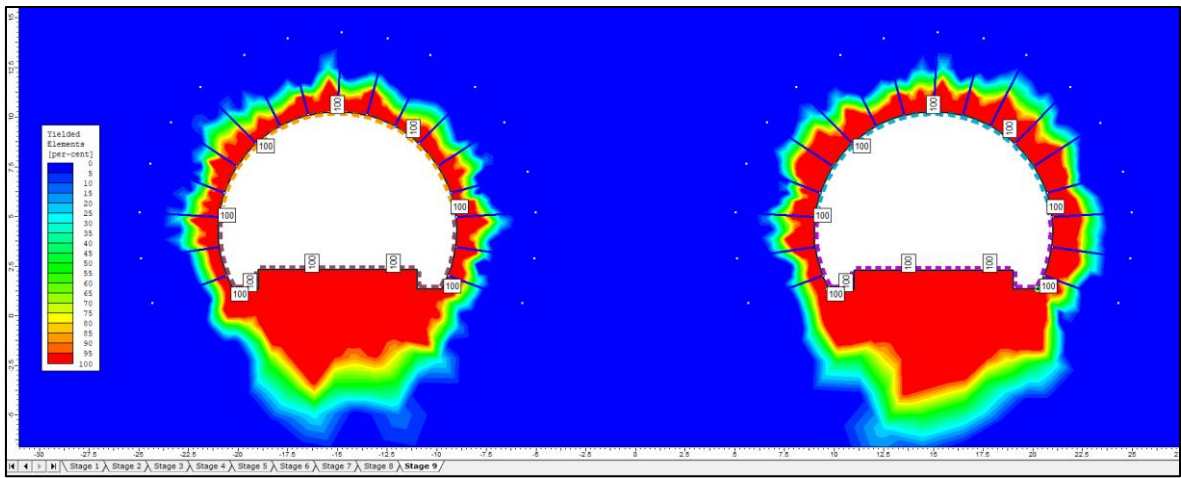
Şekil 4.33. $k=0.50$ için destek sonu toplam deformasyon miktarları



Şekil 4.34. $k=0.50$ için plastik bölge analizi



Şekil 4.35. $k=0.75$ için destek sonu toplam deformasyon miktarları

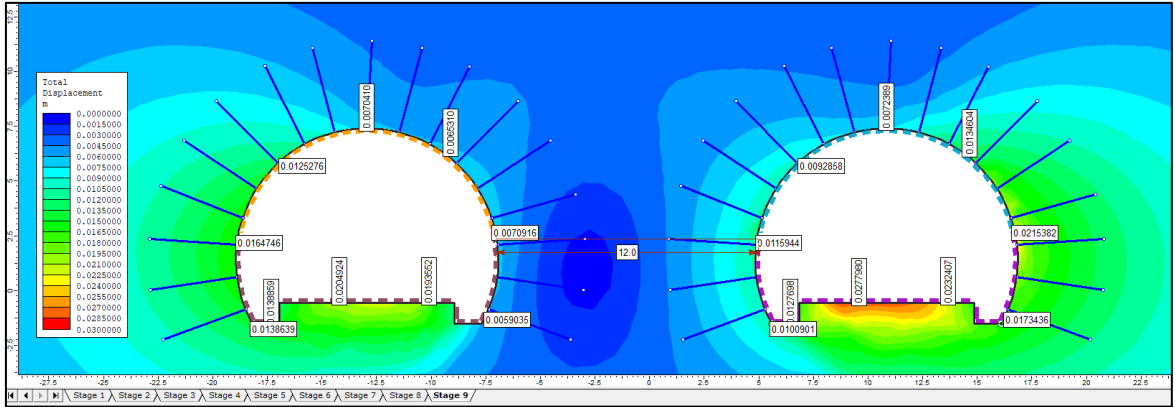


Şekil 4.36. $k=0.75$ için plastik bölge analizi

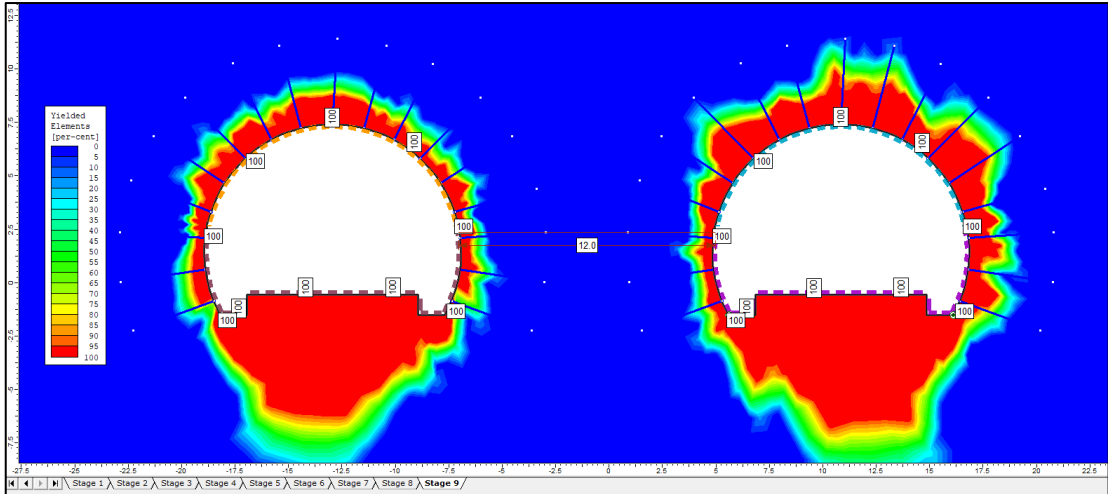
$k=0.25$, $k=0.5$ ve $k=0.75$ değerleri için yapılan analizlerde, her hangi bir bolt uygulaması yapılmayan tünelin taban bölgesinde deformasyon miktarları sırasıyla, ~ 0.027 m, ~ 0.029 ve ~ 0.033 m olarak gözlenmiştir. Artan k değerleri diğer bir ifadeyle tünele etkiyen yanal gerilmedeki artışı da yansıtmakta olup, taban bölgesindeki deformasyonlardaki artışın bu durumla ilişkili olduğu söylenebilir. Diğer taraftan $k=0.25$ değeri için boltların yer yer plastik bölge içinde kaldığı buna karşın, $k=0.5$ ve $k=0.75$ değerleri için boltların plastik bölgeyi geçtiği ve uygulama performansının sağlandığı görülmektedir. $k=0.25$ 'in ise oldukça düşük bir alt sınır değeri olduğu dikkate alınarak, ortalama kalkışist kaya kütleli deformasyon modülü için 6.38 GPa değeri için belirlenebilecek ortalama $k=0.4$ değeri için de boltların plastik bölgenin gerisine uzanması beklenebilir.

4.1.2. İkiz tünel arasındaki mesafenin etkisine yönelik analizler

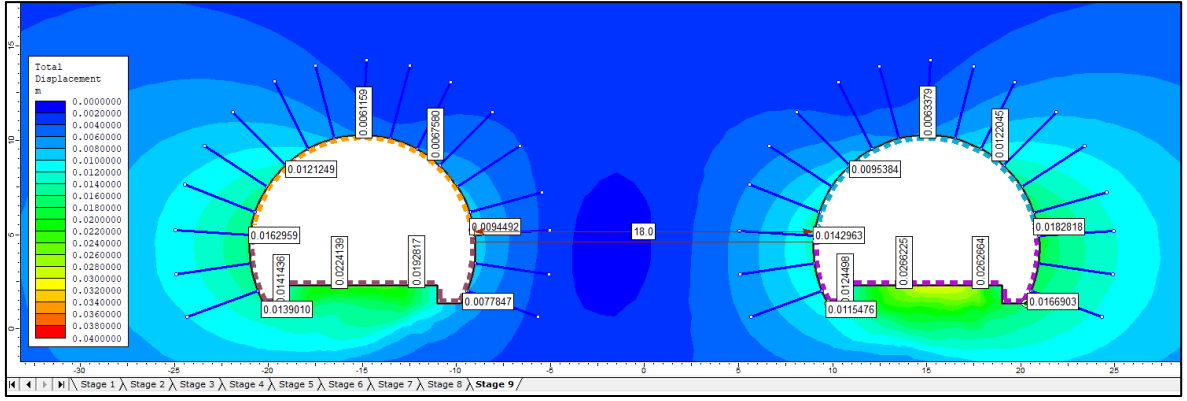
Bu tez kapsamında sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan bir başka değerlendirme ise ikiz tünel arasındaki mesafenin deformasyon ve plastik bölge dağılımına olan etkilerinin incelenmesidir. Bu çerçevede tünel tip kesitleri aynı kalmak koşulu ile platform eksenleri arasındaki mesafeler mevcut projedekine göre artırılıp azaltılmış ve bu değişimin analiz sonuçları irdelenmiştir. Gökçebelen tünelindeki ikiz tünel arasındaki mesafe 18 m ve tünel yarıçapı (r) ise 6 m olarak planlanmıştır. Sonuç olarak da ikiz tünel arasındaki uzaklığın $L=12$, $L=18$ ve $L=24$ m durumlarındaki deformasyon ve plastik bölge dağılımlarının belirlenmesi amacıyla yapılan analizlerde, $k=0.5$ olarak alınmış ve $k=0.5$ için hesaplanan tünel çekirdek kazı bölgeleri için kaya kütlelerinin indirgenmiş elastisite modülü kullanılmıştır. Tüneli çevreleyen hakim birim kalsiyet kaya kütleleri ve ince bir bant şeklinde en kesitte yer alan kireçtaşı kaya kütleleri için önceki analizlerde kullanılan girdi parametreleri dikkate alınmıştır (Şekil 4.37 – Şekil 4.42).



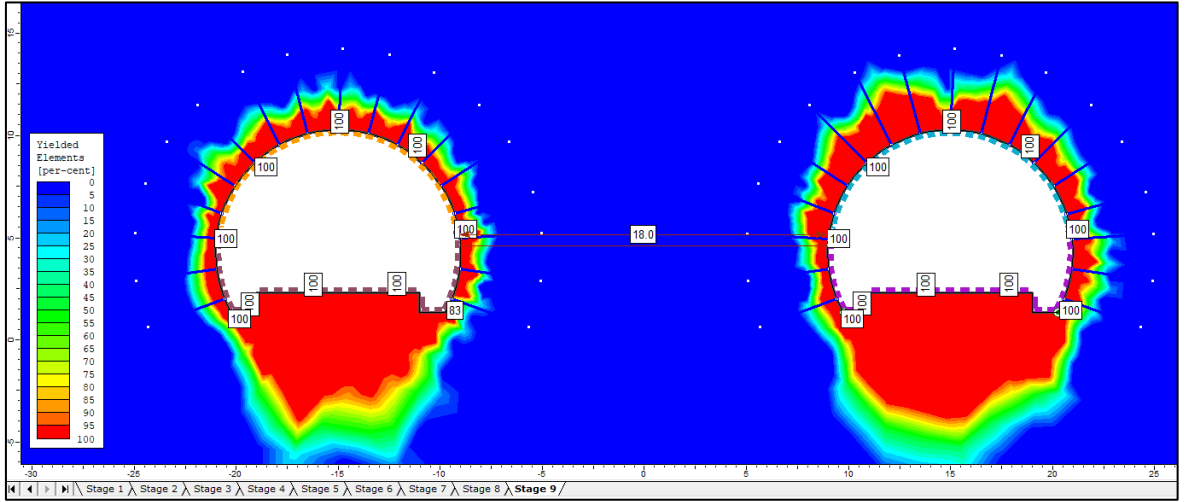
Şekil 4.37. $L=12.0$ m kesiti için destek sonu toplam deformasyon dağılımı



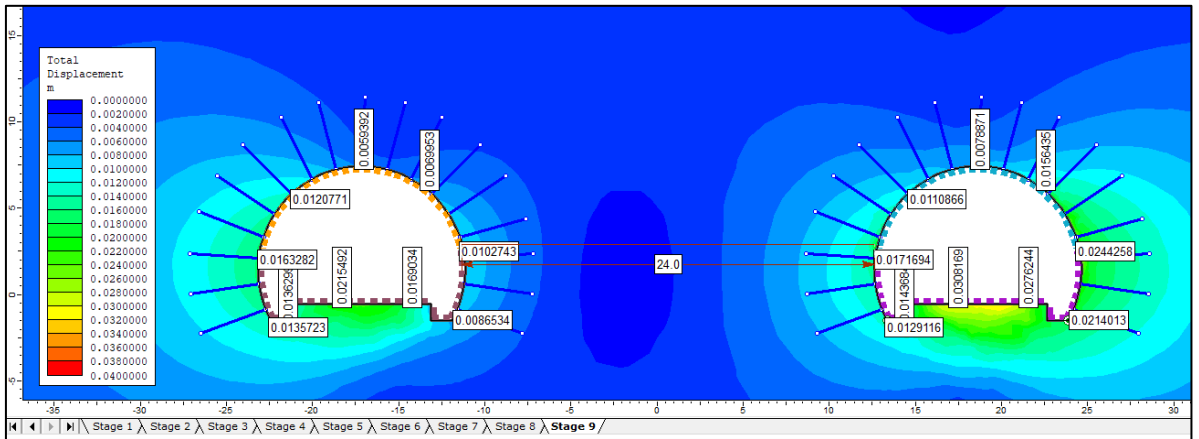
Şekil 4.38. $L=12.0$ m kesiti için plastik bölge dağılımı



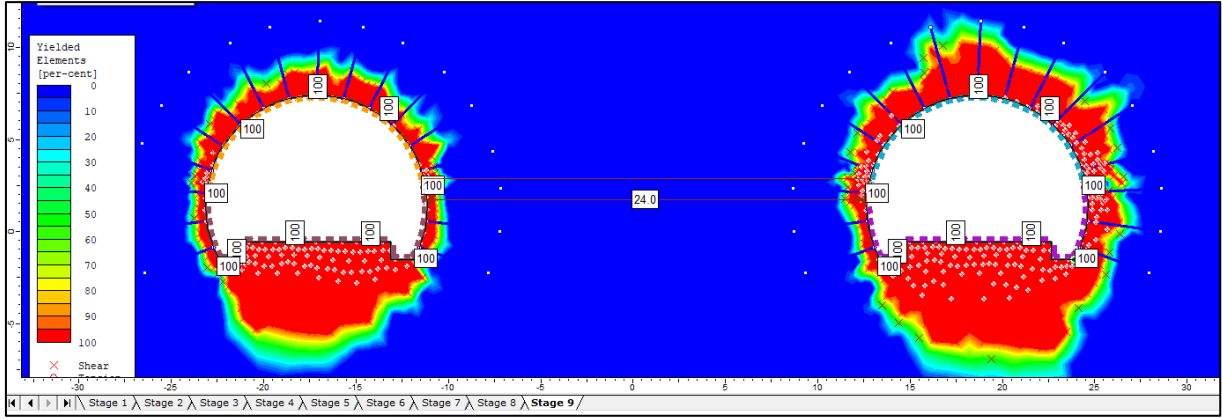
Şekil 4.39. $L=18.0$ m kesiti için destek sonu toplam deformasyon miktarları



Şekil 4.40. $L=18.0$ m kesiti için plastik bölge analizi



Şekil 4.41. $L=24.0$ m kesiti için destek sonu toplam deformasyon miktarları



Şekil 4.42. L=24.0 m kesiti için plastik bölge analizi

İkiz tünelle ilişkin Şekil 4.3'deki imalat aşamalarından da görüleceği üzere, önce sağ tüpün imalatı tamamlandıktan sonra sol tüpün imalatı senaryo edilmiştir. Bunun bir yansıması olarak, tüneller arasındaki bölgede plastik zonların gelişimi de gözlenmemektedir. İkiz tünel arasındaki mesafenin 12 m'nin altına düşürülmesi de uygulanan botların bir biri içerisine girişim yapması nedeniyle mesafeye bağlı analiz serisine eklenmemiştir.

4.2. Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçlarına İlişkin Değerlendirmeler

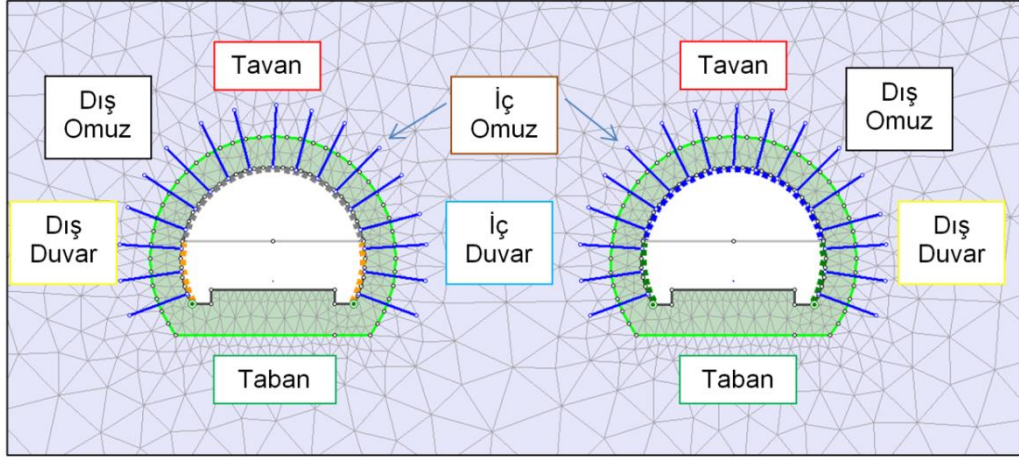
“k” sabitindeki olası değişiminin ve iki tünel arasındaki mesafenin değişiminin deformasyon ve plastik bölge dağılımına olan etkileri, Gökçebelen Tüneli projesinden seçilen bir kesit kullanılarak değerlendirilmiştir.

Şekil 4.43'de yatay gerilmenin düşey gerilmeye oranı olan “k” parametresinin değişiminin deformasyon eğilimi ile olan ilişkisinin yorumlanmasında dikkate alınan deformasyon bölgeleri sunulmuştur. Bu değerlendirmede dikkate alınan kesitte ikiz tünel olup, dış ve iç tanımlamaları kullanılmıştır. Dış tanımı, iki tünelin birbirine en uzak mesafesinde yer alan omuz ve yan duvarları, iç tanımı ise tünellerin birbirlerine en yakın bölgelerini temsil etmektedir (Şekil 4.43).

Sonlu elemanlar analiz sonuçlarının değerlendirilmesi aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- i. Sheorey'in [1] önerdiği eşitlik kullanılarak, seçilen en kesit ve gerekli diğer girdi parametrelerine göre yapılan hesaplanmalarda “k” parametresinin 0.34 ile 0.48 arasında değişebileceği belirlenmiştir. Bu çerçevede analiz

kombinasyonlarında kullanılacak “k” oranı, bu değerleri de kapsayacak şekilde 0.25, 0.5 ve 0.75 olarak alınmıştır.



Şekil 4.43. İkiz tüneldeki deformasyon değerlendirme bölgeleri

- ii. Tünel analizlerindeki önemli bir girdi parametresi olan kaya kütlelerinin elastisite modülü (E_m) birden fazla görgül eşitlik dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu hesaplamalara göre tünelin açılacağı çevre kayaç ortamı için ortalama elastisite modülü 6.38 GPa olarak bulunmuştur. Yapılan analizlerde bir başka önemli girdi parametresi ise tünel kazısının dikkate alınan kesite yaklaştığı andaki tünel çekirdek kazı bölgelerindeki indirgenmiş elastisite modülüdür. Kaya kütlelerine ait elastisite modülünün kademeli olarak düşürülmesi sonucunda bulunan deformasyonların, Vlachopoulos ve Diederichs'in [44] önerdiği ve aynaya olan uzaklık, tünel yarıçapı ve plastik bölge yarıçapı gibi parametreleri dikkate alan abağı yardımıyla, birincil (ilk) elastisite modülünün (E_m) indirgenmesi gereken değer belirlenmiştir. Her bir “k” oranı için bulunan indirgenmiş elastisite modülü değerleri;

- ✓ k=0.25 için $E_{\text{indirgenmiş}}=5200$ MPa
- ✓ k=0.50 için $E_{\text{indirgenmiş}}=3600$ MPa
- ✓ k=0.75 için $E_{\text{indirgenmiş}}=3000$ MPa

olarak belirlenmiştir. Bu değerlere göre; “k” sabitinin artması, bir başka deyişle yatay gerilmelerin düşey gerilmelere oranının artmasıyla beraber tünel çekirdek kazı bölgesindeki kaya kütlelerine ait nihai deformasyon

analizlerinde kullanılacak indirgenmiş elastisite modülünün de düştüğü görülmektedir.

- iii. Tünel gövdesinde, örtü yükünün yaklaşık olarak 440 m olduğu en kesit üzerinde yapılan analizler, Phase2 programında kutu kesit içerisine alınarak, doğal araziden gelecek düşey ve yanal gerilmeler etki ettirilerek yapılmıştır. Yapılan değerlendirmelerde yatay gerilmenin düşey gerilmeye oranı “k” parametresinin sahadaki olası değişiminin 0.34 ile 0.48 arasında olabileceği hesaplanmış ve 0.25, 0.5 ve 0.75 “k” parametreleri için tünelin; tavan, omuz, yan duvarlar ve taban bölgelerinin deformasyon miktarlarıyla, plastik bölge dağılımı irdelenmiştir. “k” parametresinin değişiminden bağımsız olarak genel anlamda deformasyon eğilimi en fazladan en aza doğru; taban, dış ve iç omuz bölgesi, iç ve dış duvarlar ile tavan olarak sıralanabilir. “k” parametresinin artması bir başka deyişle yatay gerilmelerin artması ile taban, iç omuz ve tavan bölgelerindeki deformasyonlar artmıştır. Dış duvar bölgesinde “k” parametresinin 0.25’den 0.50’ye yükselmesi ile beraber deformasyonlar 21 mm’den 18 mm’ye düşmüş ve bu noktadaki “deformasyon değeri k” parametresinin 0.75 değerini almasıyla herhangi bir değişiklik göstermemiştir. Sonuç olarak yatay gerilmelerin artmasının daha çok tünel kesitinin taban ve tavan bölgelerindeki deformasyonlarla ilişkili olduğu gözlenmiştir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Farklı “k” parametrelerine göre tünelin farklı bölgelerindeki deformasyon miktarları

“k” katsayısı	Deformasyon (mm)					
	Tavan	Dış Omuz	İç Omuz	Dış Duvarlar	İç Duvarlar	Taban
0.25	4	13	8	21	16	27
0.50	6	12	9	18	13	29
0.75	10	13	11	18	12	33

k=0.25, k=0.5 ve k=0.75 değerleri için yapılan analizlerde, her hangi bir bolt uygulaması yapılmayan tünelin taban bölgesinde deformasyon miktarları sırasıyla, ~0.027 m, ~0.029 ve ~0.033m olarak gözlenmiştir. Artan k değerleri diğer bir ifadeyle tünele etkiyen yanal gerilmedeki artışı da yansıtmakta olup,

taban bölgesindeki deformasyonlardaki artışın bu durumla ilişkili olduğu söylenebilir. Diğer taraftan $k=0.25$ değeri için boltların yer yer plastik bölge içinde kaldığı buna karşın, $k=0.5$ ve $k=0.75$ değerleri için boltların plastik bölgeyi geçtiği ve uygulama performansının sağlandığı görülmektedir. 440 m örtü kalınlığıyla birlikte $k=0.25$ 'in ise oldukça düşük bir alt sınır değeri olduğu da dikkate alınarak, ortalama kalkıştı kaya kütlesi deformasyon modülü için 6.38 GPa değeri için belirlenebilecek ortalama $k=0.4$ değeri için de boltların plastik bölgenin gerisine uzanması beklenebilir.

- iv. Tez kapsamında örtü kalınlığının 440 m olduğu en kesitte, ikiz tünellerin birbirleri arasındaki uzaklığın değişkenlik göstermesi halindeki deformasyon eğilimleri, yapılan sayısal analizlerle değerlendirilmiştir. İkiz tünel arasındaki mesafe, projede öngörülen 18 m'yi de kapsayacak şekilde tünel yarıçapı olan 6 m artırılıp azaltılmış ve ikiz tünel mesafe uzaklık 12, 18 ve 24 m olacak şekilde en kesitler yeniden düzenlenmiştir. Bu amaçla yapılan analizlere ilişkin deformasyon miktarları ikiz tünelin farklı bölgeleri için Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.2. İkiz tünel arasındaki uzaklık değişiminin deformasyon ile ilişkisi

Tüneller Arası Mesafe (m)	Deformasyon (mm)					
	Tavan	Dış Omuz	İç Omuz	Dış Duvarlar	İç Duvarlar	Taban
12	7	14	9	22	12	28
18	6	12	9	18	14	30
24	8	16	11	24	18	32

İkiz tünele ilişkin Şekil 4.3.'deki imalat aşamalarından da görüleceği üzere, önce sağ tüpün imalatı tamamlandıktan sonra sol tüpün imalatı senaryo edilmiştir. Bunun bir yansıması olarak, tüneller arasındaki bölgede plastik zonların gelişimi de gözlenmemektedir. İkiz tünel arasındaki mesafenin 12 m'nin altına düşürülmesi de uygulanan botların bir biri içerisine girişim yapması nedeniyle mesafeye bağlı analiz serisine eklenmemiştir. İkiz tünel arasındaki mesafe değişiminden düşük miktarlarda da olsa genel olarak omuz, duvar ve taban bölgeleri etkilenmiştir (bkz. Çizelge 4.2).

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, yerinde gerilme koşullarının ve ikiz tüneller arasındaki uzaklığın deformasyonlara olan etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Phase2 programı kullanılarak oluşturulan sayısal modeller üzerinde, yatay gerilmenin düşey gerilmeye olan oranının (k parametresi) olası gerçekçi sınır değerler içerisindeki değişiminin ve ayrıca ikiz tüneller arasındaki uzaklık değişiminin, deformasyon ve plastik bölge analiz sonuçlarına olan etkisi örnek bir en kesit kullanılarak değerlendirilmiştir.

- i. Yapılan analizlerde tünel kazısının kontrollü mekanik kazı ile yapılacağı kabul edilmiş ve tünel çevresindeki kayada herhangi bir örselenme zonu tanımlanmamıştır.
- ii. Sheorey'in [1] önerdiği eşitlik kullanılarak, seçilen en kesit ve gerekli diğer girdi parametrelerine göre yapılan hesaplanmalarda "k" parametresinin 0.34 ile 0.48 arasında değişebileceği belirlenmiştir. Bu çerçevede analiz kombinasyonlarında kullanılacak "k" oranı, bu değerleri de kapsayacak şekilde 0.25, 0.5 ve 0.75 olarak alınmıştır.
- iii. Tez kapsamında yapılan deformasyon analizlerinde, 2 boyutu esas alan Phase2 programında 3. boyutun, bir başka deyişle kazı aynasına yaklaşmaya bağlı olarak deformasyonların öngörülmesine yönelik "https://www.rocscience.com/help/rs2/pdf_files/tutorials/Tutorial_18_3D_Tunnel_Simulation_using_Core_Replacement.pdf" web adresinden ulaşılabilen eğitim yazısındaki Çekirdek Değiştirme Tekniğinden (Core Replacement Technique, Material softening) yararlanılmıştır. Bu yaklaşımla tünel çekirdek kazı bölgelerindeki indirgenmiş elastisite modülü değerleri $k=0.25$, $k=0.5$ ve $k=0.75$ değerleri için ayrı ayrı belirlenmiştir. Bu değerlere göre; "k" sabitinin artması, bir başka deyişle yatay gerilmelerin düşey gerilmelere oranının artmasıyla beraber tünel çekirdek kazı bölgesindeki kaya kütlelerine ait nihai deformasyon analizlerinde kullanılacak indirgenmiş elastisite modülünün de 5200 MPa'den 3000 MPa'ya düştüğü görülmektedir.
- iv. $k=0.25$, $k=0.5$ ve $k=0.75$ değerleri için yapılan analizlerde, her hangi bir bolt uygulaması yapılmayan tünelin taban bölgesinde deformasyon miktarları

sırasıyla, $\sim 0.027\text{m}$, $\sim 0.029\text{m}$ ve $\sim 0.033\text{m}$ olarak gözlenmiştir. Artan k değerleri diğer bir ifadeyle tünele etkiyen yanal gerilmedeki artışı da yansıtmakta olup, taban bölgesindeki deformasyonlardaki artışın bu durumla ilişkili olduğu söylenebilir. Diğer taraftan $k=0.25$ değeri için boltların yer yer plastik bölge içinde kaldığı buna karşın, $k=0.5$ ve $k=0.75$ değerleri için boltların plastik bölgeyi geçtiği ve uygulama performansının sağlandığı görülmektedir. 440 m örtü kalınlığıyla birlikte $k=0.25$ 'in ise oldukça düşük bir alt sınır değeri olduğu dikkate alınarak, ortalama kalkışist kaya kütlesi deformasyon modülü için 6.38 GPa değeri için belirlenebilecek ortalama $k\sim 0.4$ değeri için de boltların plastik bölgenin gerisine uzanması beklenebilir.

- v. Örtü kalınlığının 440 m olduğu en kesitte, ikiz tünellerin birbirleri arasındaki uzaklığın değişkenlik göstermesi halindeki deformasyon eğilimleri, yapılan sayısal analizlerle değerlendirilmiştir. İkiz tünel arasındaki mesafe projede öngörülen 18 m'yi de kapsayacak şekilde tünel yarıçapı olan 6 m arttırılıp azaltılmış ve ikiz tünel mesafe uzaklık 12, 18 ve 24m olacak şekilde en kesitler yeniden düzenlenmiştir. İkiz tünele ilişkin Şekil 4.3'deki imalat aşamalarından da görüleceği üzere, önce sağ tüpün imalatı tamamlandıktan sonra sol tüpün imalatı senaryo edilmiştir. Bunun bir yansıması olarak, tüneller arasındaki bölgede plastik zonların gelişimi de gözlenmemektedir. İkiz tünel arasındaki mesafenin 12 m'nin altına düşürülmesi de uygulanan boltların bir biri içerisine girişim yapması nedeniyle mesafeye bağlı analiz serisine eklenmemiştir. İkiz tünel arasındaki mesafe değişiminden düşük miktarlarda da olsa genel olarak omuz, duvar ve taban bölgeleri etkilenmiştir.
- vi. 2 boyutlu sayısal arazi modellerinde yapılacak tünel analizlerinde, 3. boyutta değişkenlik gösterebilecek jeolojik ve yapısal koşulların analiz aşamalarına daha gerçekçi ve doğru bir şekilde yansıtılması için, kazı hattı boyunca (3. boyut) meydana gelecek deformasyonların ve tünel çekirdek malzemesinin ilerleme aralığı, tünelin yarıçapı ve plastik bölge kalınlığı gibi parametrelere bağlı olarak değişen kütle deformasyon modülünün indirgeneceği değerlerin tayin edilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Sheorey, P. R., A theory of in-situ stress in isotropic and transversely isotropic rock Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. 31 (1). 23-34, **1994**.
- [2] Goodman, R. E., Introduction to Rock Mechanics. John Wiley&Sons, 362 p, **1980**.
- [3] Hoek, E., and Brown, E. T., Underground Excavations in Rock, Institution of Mining and Metallurgy, Stephen Austin and Sons, London, 527 p, **1980**.
- [4] Bieniawski. Z. T., Rock Mass Classification as a Design Aid in Tunneling, Tunnels and Tunneling International, July Issue, 19-22, **1988**.
- [5] Özkan, İ. ve Ünal, E., Kaya Kütleli Sınıflama Sistemleri Üzerine Kritik Bir Değerlendirme, 3. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Ankara, 181-193, **1996**.
- [6] Terzaghi, K., Rock Defects and Loads on Tunnel Support, In Rock Tunneling With Steel Supports (eds R. V. Proctor and T. L. White), 17-99, Youngstown, OH Commercial Shearing and Stamping Company, **1946**.
- [7] Deere, D. U., Peck, R. B., Parker, H. W., Monsees, J. E., and Schmidt, B., Design of Tunnel Support Systems, Highway Research Record, No. 339, Highway Research Board, pp. 26-33, **1970**.
- [8] Karpuz, C., Hindistan, M. A., Kaya Mekaniği İlkeleri, Uygulamaları, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, **2008**.
- [9] Bieniawski, Z. T., Engineering Rock Mass Classifications, John Wiley and Sons, 237p, **1989**.
- [10] Lauffer, H., Gebirgsklassifizierung Für Den Stollenbau, Geologie und Bauwesen, 24, 46-51, **1958**.
- [11] Pacher, F. Deformation Measurement in a test Gallery for the Exploration of Ground Response and Tunnel Design (in German), Felsmechanik u. Ingenieurgeologie, Suppl, I., **1964**.
- [12] Deere, D. U. and Miller, R. P., Engineering Classification and Index Properties For Intact Rock, Tech. Rept. No AFWL – 65-116, Air Force Base, New Mexico, **1966**.
- [13] Wickham, G. E., Tiedemann, H. R. and Skinner, E. H., Support Determination Based on Geologic Predictions, In Proc. North American Rapid Excav. Tunneling Conf. Chicago, (eds K. S. Lane and L. A. Garfield), 43-64, New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs., **1972**.

- [14] Bieniawski, Z. T., Engineering Classification of Jointed Rock Masses, Transaction of South African Institution of Civil Engineering, 15, 335-344, **1973**.
- [15] Barton, NR., A Review of the Shear Strength of Filled Discontinuities in Rock, Norwegian Geotechnical Institute Publication, No. 105, 38p, **1974**.
- [16] ISRM, Suggested Methods: Rock Characterization, Testing and Monitoring, E. T. Brown (ed.), Pergamon Press, London, 211p, **1981**.
- [17] Bieniawski, Z. T., Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 97-133, **1984**.
- [18] Ulusay, R. ve Sönmez, H., Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, 2. Baskı, Ankara, 292s, **2007**.
- [19] Ünal, E., Rock reinforcement design and its applications in mining. Proceedings of the International Congress on Rock Support, Sadbury, Ontario, Canada, pp. 541-46, **1992**.
- [20] Barton, N.R., Lien, R. and Lunde, J, Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech.* 6(4), 189-239, **1974**.
- [21] Bieniawski, Z. T., Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 97-133, **1984**.
- [22] Grimstad, E., and Barton, N., Updating the Q-System for NMT, Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete-Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Oslo, Norwegian Concrete Association, **1993**.
- [23] Hoek, E. Strength of rock and rock masses. In: News journal of the International Society of Rock Mechanic, 2, 2, pp 4-16, **1994**.
- [24] Hoek ve Brown, 1997
- [25] Hoek, E., Marinos, P. and Benissi, M., Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for weak and sheared rock-masses – The case of the Athens Schist formation. In: Bull. Eng. Geol. Env. 57(2), 151-160, **1998**.
- [26] Marinos, P., and Hoek, E. GSI: A geologically friendly tool for rock-mass strength estimation. In: Proc. GeoEng2000 at the Int. Conf. on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, Technomic publishers, Lancaster, Pennsylvania, pp 1422-1446, **2000**.
- [27] Hoek, E., and Marinos, P. A brief History of the Development of the Hoek-Brown Failure Criterion. Soils and Rocks, São Paulo, 30(2), 85-92, May-August, **2007**.

- [28] Sönmez, H., and Ulusay. R., Modifications to the geological strength index (GSI) and heir applicability to stability of slopes. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, (36), 743-760, **1999**.
- [29] Sönmez, H., and Ulusay, R., Discussion on the Hoek-Brown Failure Criterion and Suggested Modifications to the Criterion Verified by Slope Stability Case Studies, *Yerbilimleri*, 26, **2002**.
- [30] Rabcewicz, L., The New Austrian Tunneling Method, *Water Power*, Nov, **1964**.
- [31] KGM, Karayolu Teknik Şartnamesi, KGM yayınları No: 267, **2006**.
- [32] Amadei, B., Stephansson, O., *Rock Stress and its Measurement*. Chapman and Hall: London, **1997**.
- [33] Aksoy, C. O., Kömürlü, E., *Temel Madencilik Bilgileri*, Mayeb Basın Yayın İnsan Kaynakları Ltd., **2017**.
- [34] Öner, E., Gazipaşa 5. Bölge Hududu Yolu Etüt ve Proje Danışmanlık Hizmetleri Tünel Kesin Proje Jeolojik – Jeoteknik Etüt Raporu, Erkaas&KOBA Mühendislik Müşavirlik, **2015**.
- [35] Bieniawski, Z.T. *Milestones in rock engineering*. Rotterdam ; Brookfield, Vt. : A.A. Balkema, 438, **1996**.
- [36] Hoek, E., Carranza-Torres, C. T., and Corkum, B., Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium*, Toronto, Canada, Vol 1, pp. 267-273, **2002**.
- [37] Hoek, E., Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal*, 2 (2), 4-16, **1995**.
- [38] Serafim, J. L., and Pereira, J. P, Considerations of the Geomechanics Classification of Bienawski. *Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and Underground Construction*, LNEC, Lisbon, Portugal, Vol. 1, pp. 33-42, **1983**.
- [39] Barton, N., Some new Q-value correlations to assist in rockmasses fort he design of tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences*, 39, 185-216, **2002**.
- [40] Sönmez, H., Nefeslioğlu, H. A., Gökçeoğlu, C., and Kayabaşı, A., Estimation of rock modulus: for intact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 224-235, **2006**.

- [41] Hoek, E., and Diederichs, M. S., Empirical estimation of rock mass modulus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43 (2), 203-215, **2006**.
- [42] Panet, M., Guenot, A.i Analysis of Convergence Behind of a Tunnel, Proceedings of the International Conference on Tunnelling, pp. 197-204, **1982**.
- [43] Hoek, E., Tunnels in weak rock (chapter 12), in Practical Rock Engineering, (<https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>) erişim tarihi: **2018**.
- [44] Vlachopoulos, N., Diederichs, M. S., Improved Longitudinal Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis of Deep Tunnels. Rock Mech. & Rock Eng., 42:2, 131-146, **2009**.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Onur ÖZDEMİR
Doğum Yeri : İskenderun
Medeni Hali : Evli
E-posta : oozdemir.muh@gmail.com
Adresi : Alacaatlı Mah. Nev Yaşam Sitesi A Blok No: 15 Çankaya /
Ankara

Eğitim

Lise : Gaziçiftliği Lisesi
Lisans : Hacettepe Üniversitesi / Jeoloji Mühendisliği

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce, orta derecede

İş Deneyimi

2015 - Halen / Koba Mühendislik Müşavirlik Ltd. Şti. Jeoloji Mühendisi
2013 – 2015 / Hidromark A.Ş. Jeoloji Mühendisi
2010 – 2012 / Yüksel Proje Uluslararası A.Ş. Jeoloji Mühendisi

Deneyim Alanları

Jeoteknik amaçlı sondaj uygulamaları, jeolojik – jeoteknik saha araştırmaları, su yapıları ve güzergâh jeoteknik araştırma çalışmaları, şev stabilitesi araştırma ve tasarım çalışmaları, jeolojik – jeoteknik etüt raporları.

Tezden Üretilmiş projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

-



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ .ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 03/10/2018

Tez Başlığı / Konusu: YERİNDE GERİLME KOŞULLARI VE İKİZ TÜNEL ARASI UZAKLIĞIN TÜNEL ÇEVRESİNDE MEYDANA GELEN DEFORMASYONLARA ETKİSİ

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 60 sayfalık kısmına ilişkin, 03/10/2018/ tarihinde ~~şahsım~~/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 8 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/~~dâhil~~
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

03.10.2018

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Onur Özdemir
Öğrenci No: N14227266
Anabilim Dalı: Jeoloji Mühendisliği
Programı: Jeoloji Mühendisliği
Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Harun Sönmez

(Unvan, Ad Soyad, İmza)