

**TÜNELLERDE SIKIŞMAYI KONTROL EDEN BAZI  
PARAMETRELERİN ÜÇ BOYUTLU SAYISAL  
MODELLEME İLE ARAŞTIRILMASI**

**INVESTIGATION OF SOME PARAMETERS THAT  
CONTROLS SQUEEZING IN TUNNELS USING THREE  
DIMENSIONAL NUMERICAL MODELLING**

**CANSIN YÜKSEL**

**Prof. Dr. YILMAZ ÖZÇELİK**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim - Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

olarak hazırlanmıştır.

2013

**CANSIN YÜKSEL**'in hazırladığı “**Tünellerde Sıkışmayı Kontrol Eden Bazı Parametrelerin Üç Boyutlu Sayısal Modelleme ile Araştırılması**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan

(Prof. Dr., Harun SÖNMEZ)

Danışman

(Prof. Dr., Yılmaz ÖZÇELİK)

Üye

(Prof. Dr., Sair KAHRAMAN)

Üye

(Yrd. Doç.Dr., İrfan Celal ENGİN)

Üye

(Dr., A. Kemal CENGİZ)

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

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## 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 değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

16 / 09 / 2013

CANSIN YÜKSEL

## ÖZET

# TÜNELLERDE SIKIŞMAYI KONTROL EDEN BAZI PARAMETRELERİN ÜÇ BOYUTLU SAYISAL MODELLEME İLE ARAŞTIRILMASI

CANSIN YÜKSEL

Yüksek Lisans, Maden Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. YILMAZ ÖZÇELİK

Eylül 2013, 79 sayfa

Sıkışan zeminler, ayna yüzeyinde dayanıksızlık, ağır yük yüzünden desteklerin çökmesi, yüksek deformasyon ile meydana gelen düşük profiller, kaya kütlelerinde aşırı heterojenlik, yeraltı suyu, kazıklı profillerin aşırı kapanması veya tünel desteğinin tahribatı gibi pek çok soruna neden olabilir. Bu nedenle, bu tür zeminlerde tünel yapılmadan önce meydana gelebilecek olan sıkışmanın türü ve şiddeti önceden araştırılmalıdır. Özellikle, derin ve uzun tünellerde uygulama sırasında sıkışma olasılığının önceden tahmini önemlidir. Sıkışma olasılığını tahmin etmek ve sıkışmayı analiz etmek için Hoek-Brown tarafından üretilmiş olan görgül bir formül kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, sıkışan zeminlerin analizinde dikkate alınacak olan Hoek-Brown ölçütündeki parametrelerin değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu parametreleri belirlemek için yapılmış olan analizler üç boyutlu sayısal modellemeye dayanmaktadır. Modellemede Flac<sup>3D</sup> programı kullanılmıştır. Bu çalışmalar için esas olarak dört Hoek-Brown girdi parametresi dikkate alınmış ve modellenmiştir: kaya kütle parametreleri GSI (jeolojik dayanım endeksi), UCS (tek eksenli basma dayanımı),  $m_i$  (Hoek malzeme sabiti) ve H (örtü kalınlığı). Flac<sup>3D</sup>'nin Mohr-Coulomb ölçütlerini esas alması nedeniyle Hoek-Brown ölçütlerine uygun kod (FISH CODE) yazılmıştır. Daha sonra, bu parametreler modelin değişkenleri olarak kullanılmıştır. Oluşturulan grafiklerle yapılan değerlendirmeler sonucunda sıkışma olasılığını belirleyen en etkili parametreler tanımlanmıştır.

Çalışmanın sonucunda GSI, UCS ve H'nin sıkışan zeminlerin değerlendirilmesinde daha fazla etkili Hoek-Brown parametreleri olduğu belirlenmiştir. Ancak  $m_i$  parametresi için detaylı çalışmalar yapılması tavsiye edilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar tünellerdeki sıkışma analizlerinin yanı sıra, risk analizleri için de kullanılabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Sıkışan Zeminler, Hoek-Brown ölçütü, Flac<sup>3D</sup>, Sayısal Simülasyon.

## **ABSTRACT**

# **INVESTIGATION OF SOME PARAMETERS THAT CONTROLS SQUEEZING IN TUNNELS USING THREE DIMENSIONAL NUMERICAL MODELLING**

**CANSIN YÜKSEL**

**Master of Science, Department of Mining Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. YILMAZ ÖZÇELİK**

**September 2013, 79 pages**

Squeezing ground may cause a series of difficulties such as instability at the face, failing of supports due to high loads, under profiles caused by excessive deformation, extreme heterogeneity in the rock mass, ground water and extensive convergences of the bored profile or destruction of the tunnel support. Therefore, for the tunneling in such circumstances type and severity of the squeezing must be investigated first. The estimation of squeezing probability is especially important for squeezing, deep and long tunnels. To estimate and analyze the squeezing probability, Hoek-Brown developed an empirical formula.

In this study the efficient parameters of Hoek-Brown criteria are taken into account for analyzing squeezing grounds. Analyses for defining these parameters are based on three dimensional numerical modelling. Flac<sup>3D</sup> software has been used in modelling. For these studies, essentially four input parameters of Hoek-Brown are taken into account: GSI (Geological Strength Index), UCS (Uniaxial Compressive Strength),  $m_i$  (Hoek material constant) and H (overburden). Since Flac<sup>3D</sup> is based on Mohr-Coulomb criteria, a code (FISH CODE) that matches Hoek-Brown criteria was written. These parameters were used as variables on the model. The most efficient parameters for squeezing probability, are defined by evaluating the produced graphs.

In conclusion; it was observed that for the evaluation of squeezing grounds GSI, UCS and H are the most effective parameters of Hoek-Brown. However detailed studies are recommended for  $m_i$  parameter. The results obtained from this study could be used for squeezing analyses and also for risk analyses of the tunnels.

**Keywords:** Squeezing Ground, Hoek-Brown criteria, Flac<sup>3D</sup>, Numerical Simulation.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım sırasında bilgisi ve tecrübesiyle yol gösterici olan, gelişimim için her türlü imkânı sağlayan ve manevi desteğini her zaman hissettiğim tez danışmanım Sn. Prof. Dr. Yılmaz ÖZÇELİK'e,

Gerek parametrik çalışmalarımda göstermiş olduğu yardımlardan, gerekse tez yazım aşamasındaki desteklerinden ve sabrından ötürü Dr. Rohola HASANPOUR'a,

Çalışmalarım sırasında manevi desteklerini esirgemeyen Araş. Gör. S. Yasin KILLIOĞLU ve Araş. Gör. Damla GÜÇBİLMEZ'e,

Yardım ve desteğini her zaman yanımda hissettiğim dostlarım Deniz CİGAL, Can MUCUK, Funda AFYONOĞLU, Çağlar DEMİRDÖKER, Ferit ÖGE, Gamze SONBUDAK, Fahri SANDIKÇI ve Onur SARIGİL'e,

Çalışmalarım sırasında desteklerini benden esirgemeyen Suda Maden A.Ş.'ye ve çalışma arkadaşlarıma,

Tez yazım süresince beni hep destekleyen, motive eden ve bana inanan Setenay ARIKAN'a,

Hayatımda çok büyük yerleri olan, yaptığım her işte büyük destekleri olan, bana olan güvenlerini hiçbir zaman yitirmeyen annem Sema KÖREZLİOĞLU, babam Tamer YÜKSEL ve kardeşim Aysın YÜKSEL'e,

teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	vi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR İNCELEMESİ .....	7
2.1. Giriş .....	7
2.2. Hoek-Brown Yenilme Ölçütü.....	7
2.2.1. Genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütü.....	8
2.2.2. Deformasyon Modülü.....	10
2.2.3. Mohr-Coulomb Ölçütü .....	10
2.2.4. Kaya Kütle Dayanımı .....	12
2.2.5. $\sigma_{3max}'$ 'ın Belirlenmesi .....	12
2.3. Sıkışan Zemin Koşulları .....	14
2.3.1. Sıkışma Koşullarının Belirlenmesi ve Nicelleştirilmesi.....	15
2.3.2. Görgül Yaklaşımlar .....	16
2.3.3. Yarı-Görgül Yaklaşımlar .....	19
2.4. Kaya Kütleli Mukavemetindeki Belirsizlikler .....	27
2.5. Sayısal Analiz .....	27
2.5.1. Sürekli Ortamlar Yaklaşımı.....	28
2.5.2. Süreksiz Ortamlar Yaklaşımı.....	28
3. SAYISAL MODELLEME .....	29
3.1. Sayısal Yaklaşım .....	29
3.2. Sayısal Model .....	29

4. SAYISAL MODELLEME SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	33
4.1. Deformasyon Konturları.....	33
4.1.1. GSI Etkisi .....	33
4.1.2. H Etkisi .....	35
4.1.3. $m_i$ Etkisi .....	38
4.1.4. UCS Etkisi .....	40
4.2. Plastik Bölge Konturları .....	43
4.2.1. GSI Etkisi .....	43
4.2.2. H Etkisi .....	45
4.2.3. $m_i$ Etkisi .....	46
4.2.4. UCS Etkisi .....	48
5. DUYARLILIK ANALİZLERİ.....	51
5.1. GSI Parametrik Analizleri .....	53
5.2. H Parametrik Analizleri.....	54
5.3. $m_i$ Parametrik Analizleri.....	55
5.4. UCS Parametrik Analizleri.....	57
5.5. Plastik Bölge Kıyaslaması .....	58
6. SONUÇLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	68



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$a, s, m_b$	Hoek-Brown malzeme sabitleri
$B$	Tünel genişliği
$c$	Kohezyon
$c_p$	Pik kohezyon
$c_r$	Artık kohezyon
$D$	Tünel çapı
$D_h$	Hoek örselenme faktörü
$d_p$	Plastik bölge çapı
$d$	Tünel çapı
$E_{rm}$	Kaya kütlesi deformasyon modülü
$E_i$	Sağlam kayanın elastik Modülü
$H$	Örtü tabakası kalınlığı, Yüzeyin altında tünel derinliği
$H_t$	Tünel yüksekliği
$m_i$	Hoek malzeme sabiti
$N$	Kaya kütle numarası
$\rho_0$	Yerinde gerilme
$\rho_u$	Tünel astarı üzerindeki temel kaya basıncı
$P_i$	Tahkimat basıncı
$Q$	Kaya kütle kalitesi
$R$	Tünel yarıçapı
$R_c$	Tünel astarıyla temas eden sıkışma yüzeyinin yarıçapı
$R_p$	Plastik bölge yarıçapı
$x$	Yatay düzlem
$y$	Boylamsal düzlem

$z$	Dikey düzlem
$\varepsilon$	Birim deformasyon
$\varepsilon_{\theta}^c$	Teğetsel birim deformasyon
$\varepsilon_f$	Tünel aynası birim deformasyonu
$\varepsilon_e$	Elastik birim deformasyon limiti
$\varepsilon_{\theta}^e$	Kaya kütlesi için elastik birim deformasyon limiti
$\varepsilon_{\theta}^{\alpha}$	Dairesel tünel etrafında teğetsel birim deformasyon
$\varepsilon_t$	Tünel birim deformasyonu
$\varepsilon_{\theta}^a$	Dairesel tünel etrafındaki birim deformasyon düzeyi
$\phi_p$	Pik sürtünme açısı
$\phi_r$	Artık sürtünme açısı
$\gamma$	Kaya kütlesi birim ağırlığı
$\eta_p, \eta_s, \eta_f$	Normalize edilmiş deformasyon düzeyi
$\Phi$	Sürtünme açısı
$\tau$	Makaslama gerilimi
$\nu$	Poisson oranı
$\sigma$	Deviatör gerilme
$\sigma_0$	Başlangıç gerilimi
$\sigma_1$	Majör asal gerilme
$\sigma_2$	Ortalama gerilme
$\sigma_3$	Minör asal gerilme
$\sigma_{ci}, \sigma_c$	Sağlam kaya malzemesi tek eksenli basma dayanımı
$\sigma_{cm}$	Kaya kütlesi tek eksenli basma dayanımı
$\sigma_{3max}$	Maksimum minör gerilme
$\sigma_t$	kaya kütlesi çekme dayanımı
$\sigma_{\theta}^c$	Teğetsel gerilim
$\psi$	Genişleme açısı

## **Kısaltmalar**

DEM	Ayrık Eleman Yöntemi (Distinct Element Method)
DFN	Ayrık Özellik Ağı (Discrete Feature Network)
FDM	Sonlu Farklar Yöntemi (Finite Differences Method)
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method)
GSI	Jeolojik Dayanım İndeksi (Geological Strength Index)
ISRM	Uluslararası Kaya Mekaniği Topluluğu (International Society for Rock Mechanics)
TBM	Tünel Açma Makinesi (Tunnel Boring Machine)
UCS	Tek Eksenli Basma Dayanımı (Uniaxial Compressive Strength)
UDEC	Evrensel Ayrık Eleman Kodu (Universal Distinct Element Code)

# 1. GİRİŞ

Sıkışan koşullardaki bir tünelin tasarım aşamasında, tünelin vereceği tepki için güvenilir bir tahmin yapmak oldukça zordur. Belirli bir jeolojik yapıya girerken veya sıkışma sorunları üzerinde kazanılmış bir deneyim olsa bile, kazı esnasında bu tarz koşulları öngörmek güçtür. Sıkışma koşulları, kayanın heterojen olmasına ve kaya kütledeki özellik (mekanik ve hidrolik) değişimlerine bağlı olarak, kısa mesafelerde bile değişiklik gösterebilmektedir.

“Sıkışma” kelimesi Alp dağlarında açılan öncü tünel çalışmalarından gelmektedir. Tünelde sıkışma olayı, kazılmakta olan tünellerde aşırı gerilmelerden dolayı tünel kesitinin küçülmesine neden olur (Şekil 1.1). Şekil 1.1’de verilen fotoğraf karşılaşılan sıkışma koşullarıyla baş edebilmek için tünel çalışmalarının yeniden başlaması gerektiğini göstermektedir. Uluslararası Kaya Mekaniği Topluluğu (ISRM) komisyonunun çalışmalarında da vurgulandığı üzere, sıkışma ve bu mekanizmanın temeli olarak nitelendirilen “sıkışan kaya”, tünel kazısı esnasında zamana bağlı büyük deformasyonlar oluşturmaktadır. Bu deformasyonlar, malzeme özellikleri ve tetikleyici gerilmenin etkisine bağlı olarak tünel etrafındaki bazı bölgelerde çökmeye neden olmaktadır (sınırlayıcı makaslama gerilimi aşıldığında kayma başlar). Deformasyonlar kazı aşamasında sona erebilir veya uzun bir süre devam edebilir.



**Şekil 1.1.** Saint Martin La Porte’de galeri ağzında sıkışan kayanın tünel kesitini azaltması.

Tünelde meydana gelen yer konverjansı, deformasyon oranı ve tünel etrafındaki yenilme bölgesinin boyutu; jeolojik ve jeoteknik koşulların yanı sıra, kaya kütle dayanımı ile ilişkili yerinde gerilim, yeraltı suyu akışı, gözenek suyu basıncı ve kaya kütle özellikleri ile

ilişkilidir. Bu yüzden sıkışma; çökme, zamana bağlılık ve çoğunlukla kullanılan kazı ve tahkimat tekniklerine bağlı bir olgudur. Tahkimat kurulumunun gecikmesi durumunda, kaya kütlesi tünel içerisine doğru hareket eder ve etrafında yeniden gerilme dağılımı gerçekleşir. Buna karşılık, deformasyon hemen bastırılmış ise sıkışma tahkimat sisteminde uzun süreli yük birikmesine neden olacaktır.

Mühendislik bakış açısıyla, zamana bağlı iki çeşit kaya davranışı olan “sıkışma” ve “kabarma” durumunun ayırt edilmesi gerekir. Kazı sırasında ve sonrasında tünel etrafında zamana bağlı olarak oluşan büyük konverjanslara benzer sonuçlar doğuran, birbirinden tamamen farklı bu iki kaya davranışının ayırt edilmesi konusunda dikkat edilmelidir.

Değişik araştırmacıların çalışmalarından derlenmiş, sıkışan kaya davranışının farklı tanımlarını ortak çalışmalarda bulmak mümkündür. Barla vd. [1], Terzaghi [2], Jethwa vd. [3], Singh vd. [4], Aydan vd. [5] ve Hasanpour [6] vb. araştırmacılar tarafından yapılmış literatürde bulunan farklı tanımlamaların ışığında, sıkışma olaylarının temel yönleri aşağıda listelenmiştir:

- I. Kayanın, kazı karşısında verdiği sıkışma tepkisi, kazı sırasında ya da sonrasında tünelin etrafında oluşan büyük yer deformasyonlarına işaret eder.
- II. Bu deformasyonlar ilk olarak, tünel kazısının neden olduğu başlangıç gerilim alanının bozulması ile ortaya çıkar. Açıklığın etrafındaki kaya kütlesi, tetikleyici gerilmelerin etkisiyle, deformasyonlara bağlı olarak gerilir. Sağlam kaya kütlelerinde bu yer değiştirmeler doğal olarak elastiktir ve genellikle tünel çapının %1'i ile sınırlı kalır. Daha yumuşak kaya kütlesi ise yenilerek, tünel boşluğu etrafında plastik ya da kırıklı bir alan oluşturabilir. Bu mekanizma kayanın kendi sıkışma davranışını değil, sadece tüneldeki kazı çalışmasına bağlı olarak yeniden dağılımı yapılan gerilme alanına maruz kalan elasto-plastik malzemenin davranışını temsil eder.
- III. Sıkışma olayındaki özel durum kaya kütlelerinin zamana bağlı davranış göstermesinden kaynaklanır. Bu zaman bağımlılığı literatürde iki farklı faktörle açıklanmıştır:
  - a) İzin verilen makaslama geriliminin aşılmasına bağlı sünme
    - Sağlam kaya malzemesi içindeki parçalarda sünmeler (akışkan davranım ya da çatlak yayılımı),

- Tünel etrafındaki gerilmenin yenilmeye neden olarak oluşturduğu parçaların ara yüzlerindeki sünmeler,
- Yataklanma, yapraklanma yüzeyleri, çatlaklar ve faylar gibi daha büyük süreksizliklerdeki sünmeler.

Bu sünme mekanizmaları üç bilindik aşama (birincil, ikincil ve üçüncül) ve bunların birleşimlerini içerir. Genellikle, sıkışma etkisi altında olan sünme mekanizmalarının visko-plastik yapısı vardır. Ancak, özellikle düşük gerilim altında, kuvvetlerin bir kısmı geri kazanılabilir yani visko-elastik davranış gösterebilir. Sünme hareketi, genellikle bir malzemenin gerilme seviyesinin, kısa süreli makaslama kuvvetinin altında olduğu durumlarda meydana gelir. Böylece, kısa süreli dayanım testlerinin sonuçları, sünme duraylılığı ve sünme mekanizmasının türünü belirlemek için çok kullanışlı değildir.

- b) Konsolidasyon - Düşük geçirgen kaya kütleleri içindeki boşluklarda su basıncının dağılımı

Konsolidasyon sıkışma davranışı oluşumuna katkıda bulunduğu gibi zamana bağlı başka bir mekanizma olarak sünme süreci gibi de anlaşılabilir. Aslında, tünel aynası çevresinde, sünme ve pekiştirme (konsolidasyon) konuları da uzaysal gerilme dağılımında dikkate alınmalıdır. Konsolidasyon mekanizması suyu taşıyan, düşük geçirgen zeminlerdeki tünelcilik için uygundur.

- IV. Sıkışma olayı kabarma olgusu ile birbirlerine yakın olsalar da aynı değildirler. Kabarma, bazı kil minerallerinin (montmorillonit) suyun etkisi ile hacimlerinde meydana gelen yükselmeye bağlı olup çökme oluşmadan ortaya çıkar.
- V. Sıkışma hacim değişikliği olmadan da oluşabilir, ancak genleşen malzeme hacim artışı ile ilişkili olabilir.
- VI. Sıkışma olgusu kaya kütlesi gücü, yerinde gerilim, boşluk suyu basıncı, geçirgenlik, mineraloji, eklem yönlenmesi, yapım işlemleri, ilerleme oranları, destek ölçümleri ve bunlar gibi faktörlerden etkilenir.

Sıkışma davranışı fillit, çamurtaşı, silttaşı, tuz taşı ve/veya makaslanmış metamorfik ve magmatik kayalar gibi düşük dayanımlı, zayıf kayalarda görülmektedir. Mühendislik bakış açısıyla zayıf kayaları tanımlamak için kullanılan çoğu yaklaşım sağlam kayanın tek eksenli basma dayanımını baz almaktadır. Örneğin, Uluslararası Kaya Mekaniği Topluluğu UCS değer aralığı 0.25 ile 25 MPa olarak değişen kayaları “çok zayıf” veya “zayıf” olarak tanımlar [7]. Bu tezde zayıf kaya ile çalışılmaktadır.

Sıkışan zemin koşulları TBM ile kazı işlemini yavaşlatabilir veya zorlaştırabilir [8] ve hatta bazı durumlarda TBM ile kazı işleminin uygunluğu bile sorgulanabilir. Öyle ki, geçmişte, zaman zaman oldukça olumsuz tecrübeler (TBM'nin tamamen kaybı dâhil) yaşanmıştır. Sıkışan zemin olarak sınıflandırılan yerlerde TBM kullanımını genellikle çok risklidir ve bu nedenle elverişli değildir. Ancak, aşırı sıkışan ortamlar ile tamamen sorunsuz ve sağlam kayalarda açılan mekanize tünellerde birbirlerinden farklı durumlar oluşabilir. Bu da mekanizmanın tamamen anlaşılmasını engellemektedir. Bu gibi durumlar risklerin iyi belirlenmesini, ayrıntılı bir araştırmayı, teknik fizibiliteyi ve TBM uygulama maliyetini gerektirir.

Tünellerde oluşan sıkışma problemlerini belirlemek için bir dizi görgül ve yarı görgül yaklaşımlar önerilmiştir. Görgül yaklaşımlar, esas olarak tünel derinliği ve kaya kütle kalitesi ile sınıflandırma şemalarına dayanmaktadır. Bu yaklaşımlardan en önemli iki tanesi Singh vd. [4] ve Goel vd. [9] tarafından sunulmuştur. Kayadaki sıkışma potansiyelinin miktarını belirlemek için önerilen yarı görgül yaklaşımların çıkış noktası ise “yeterlilik faktörü”nün (competancy factor) kullanımınıdır. Bu yöntemlere verilebilecek başlıca iki örnek, Japonya'daki tünel deneyimlerine dayanılarak oluşturulmuş Aydan vd. [5] yaklaşımı ile Hoek ve Marinos [10] yaklaşımıdır.

Sıkışan ortamlar için önerilen görgül ve yarı görgül yaklaşımlar ile ilgili literatürde çok sayıda çalışma vardır. Bu yaklaşımların güvenilirliği, farklı koşullarda ve özel projelerden elde edilen saha verilerinin korelasyonuna dayalıdır. Bu yaklaşımların, 2000 yılı ve öncesinde yapılan çalışmalardan elde edilen veriler kullanılarak önerildiği ve şimdiye kadar birçok projede sıkışma olayı yaşandığı dikkate alındığında, sayısal analizler ile de incelenmesi ve etkili parametrelerin bulunması bir zorunluluk olarak ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla, şimdiye kadar geliştirilen yaklaşımlardan güvenilir sonuçlar üretmek için, bu yöntemlerin sayısal analiz sonuçlarına göre de incelenmesi gerekmektedir. Ayrıca, bugüne kadar sıkışmayla ilgili olarak yapılan sayısal analizler genellikle iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ise üç boyutlu benzetimler ile sayısal analizler yapılacağı için daha ayrıntılı ve yerindeki koşulları daha iyi yansıtan analizlerin yapılması mümkün olmaktadır. Yapılan analizlerde bugüne kadar aynı anda detaylı bir şekilde tünel boyunca incelenmeyen pek çok değişken kaya parametresi bu çalışmada göz önüne alınarak parametrik bir çalışma yapılmıştır.

Önerilen tezin genel amacı, sıkışmaya bağlı olarak gelişebilecek aşırı yer konverjans potansiyelinin sistematik olarak değerlendirilmesidir. Bu amaçla tezde yapılan çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Sıkışma davranışı detaylı bir biçimde incelenmiş ve bu konu ile ilgili şimdiye kadar önerilen görgül ve yarı görgül yaklaşımlar sunulmuştur.
- Hoek ve Marinos [10] tarafından sıkışma potansiyelinin tahmini için önerilen yaklaşım, Hoek ve Brown yenilme ölçütüne göre seçilmiş olan en önemli üç etkin faktör, GSI, UCS ve  $m_i$  için uygulanmıştır. Sonuç olarak birim deformasyonları, plastik bölge yarıçapları ve sıkışma dereceleri farklı parametreler için hesaplanmıştır.
- Üç etkin faktöre ilaveten en önemli faktörlerden biri olan tünel örtü kalınlığı da analizlere dâhil edilerek daha geniş analizler yapılmıştır.
- Daha sonra, sonlu farklar yöntemi (FLAC<sup>3D</sup> programı) kullanarak üç boyutlu sayısal modeller oluşturulmuş ve aynı parametreler sayısal simülasyonlar üzerinde de değerlendirilmiştir. Ayrıca, deformasyon konturları ve plastik bölge kalınlıkları farklı parametreler için elde edilmiştir.
- Yarı görgül yaklaşımlardan alınan bilgiler, çalışmanın ana vurgusu olup sayısal modellemelerin doğrulaması için de kullanılmıştır.
- Duyarlılık analizlerine dayanarak benzetim sonuçları ile yarı görgül yaklaşımdan alınan sonuçlar karşılaştırılmış ve modellerin geçerlilik ve etkinlikleri değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, literatürde verilen Hoek ve Marinos [10] yaklaşımından yararlanılarak sıkışma potansiyeli olan ortamların davranışının iyi bir şekilde anlaşılması hedeflenmiştir. Ayrıca, tezin amacı doğrultusunda, tünel açılırken uzaysal gerilme dağılımının da etkisini dikkate almak suretiyle daha detaylı incelemeler üç boyutlu modellemeler ile gerçekleştirilmiştir.

Tezin 2. Bölümünde, Hoek ve Brown yenilme ölçütüne, tezde kullanılan parametrelerin anlamlarına ve sıkışan ortamları belirlemek amacıyla geliştirilen yaklaşımlara yönelik detaylı bir literatür taraması verilmiştir.

3. Bölümde, Hoek ve Marinos'un [10] yarı görgül yaklaşımı, GSI, UCS,  $m_i$  ve H olmak üzere Hoek ve Brown'nın [11] dört farklı değişken parametreleri, kendine özgü birkaç



hipotetik tünel kazısında, sıkışma seviyelerinin belirlenmesi için kullanılmıştır. Ayrıca, yarı görgül yaklaşımları sayısal analizler ile değerlendirmek için sonlu farklar yöntemine dayanılarak, FLAC<sup>3D</sup> programı kullanılmıştır. Her iki yaklaşım için de bütün modellerde plastik yarıçap hesaplanmış ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

4. Bölümde, sayısal modelleme sonuçları Hoek ve Brown yenilme ölçütüne göre GSI, H, UCS ve  $m_i$  değişkenleri için ayrı ayrı verilmiştir. Sayısal modellemeden elde edilen deformasyon konturları ve plastik bölge kalınlığı olarak ayrı ayrı sunulmuştur.

5. Bölümde, sayısal modellemede kullanılan kaya kütlesi değişkenleri, GSI, UCS,  $m_i$  ve H, tünel etrafında oluşan birim deformasyon değerlerine göre grafiksel olarak sunulmuş ve sıkışma derecesi bu grafiklere bağlı olarak verilmiştir. Daha sonra sayısal modelden alınan sonuçlar ile yarı görgül yaklaşımdan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sayısal modellemede, tünelin kuru ortamda kazıldığı varsayılmıştır. Bu yüzden su basıncının oluşturacağı baskı dikkate alınmamıştır.

Son olarak, 6. Bölümde ise çalışmalardan elde edilen temel sonuçlar verilmiştir.

## 2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

### 2.1. Giriş

Bu bölümde, Hoek ve Brown yenilme ölçütüne, tezde kullanılan parametrelerin anlamlarına ve sıkışan ortamları belirlemek amacıyla geliştirilen yaklaşımlara yönelik detaylı bir literatür taraması verilmektedir.

### 2.2. Hoek-Brown Yenilme Ölçütü

Hoek ve Brown [11, 10] yeraltı kazı tasarımlarında kullanılacak olan gerekli analizlere veri girişi sağlamak için kendi yenilme ölçütlerini tanıtmıştır. Bu ölçüt, Hoek [12]'in sağlam kayaların kırılma davranışına dair araştırma sonuçlarından ve Brown [13]'ün parçalı kaya kütleli davranışının model çalışmalarından elde edilmiştir. Ölçüt, sağlam kayanın özellikleriyle başlamış ve sonra kaya kütleli parçaların karakteristiğinin temelindeki bu özellikleri azaltmak için faktörleri de içermektedir. Yazarlar görgül ölçütü mevcut kaya kütleli sınıflandırma sistemleri aracılığı ile jeolojik gözlemlerle ilişkilendirmek için çalışmalarda bulunmuş, bu amaç doğrultusunda başlangıçta Bieniawski [13] tarafından hazırlanan Kaya Kütle Puanlaması (Rock Mass Rating) sistemini kullanmayı seçmişlerdir.

Uygun alternatiflerin eksikliği yüzünden ölçüt, kısa süre içinde kaya mekaniği topluluğu tarafından kabul edilmiş ve ölçütün kullanımı, orijinal kullanım alanı ve ortaya konulma sebebi olan dayanım azaltma ilişkilerinin dışındaki alanlarda da hızlıca yayılmıştır. Sonuç olarak, bu ilişkileri yeniden gözden geçirmek ve ölçütün uygulanmasında zaman zaman yaşanan çok çeşitli uygulama sorunlarının hesaba katılması için yeni unsurlar tanıtmak gerekli olmuştur. Bu gelişmeler tipik olarak Hoek ve Brown'ın "sağlam" ve "örselenmiş" kaya kütleleri fikrinin başlangıcı ve çok zayıf kaliteli kaya kütlelerinde kaya kütleli çekme dayanımının sıfır olmasına zorlayacak düzeltilmiş ölçütün başlangıcıdır [14].

Başlarda ortaya çıkan zorluklardan bir tanesinin oluşma nedeni olan jeoteknik sorunlar, özellikle şev duraylılığı sorunları, orijinal Hoek-Brown ölçütündeki asal gerilme ilişkilerinden, makaslama ve normal gerilmelerin ele alındığı formül ile aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5} \quad (1)$$

$\sigma'_1$  ve  $\sigma'_3$  yenilmedeki majör ve minör etkili asal gerilmelerdir,

$\sigma_{ci}$  sağlam kaya malzemesi için tek eksenli basma dayanımıdır ve,

$m$  ve  $s$  malzeme sabitleridir (sağlam kaya için  $s = 1$ ).

Eşitlik 1 ile yenilme durumundaki normal ve makaslama gerilimi arasındaki aynı ilişki Bray (Hoek [15] tarafından raporlanmıştır) ve daha sonra Uçar [16] ve Londe [17] tarafından elde edilmiştir. Hoek, eşdeğer sürtünme açıları ve çeşitli uygulama durumları için kohezyon parametrelerinin türetilmesini tartışmıştır. Bu türetmelerin, Mohr dairesinin teğetlerini esas aldığı türetmeyi ise Bray yapmıştır. Hoek [18], kohezif dayanımın üst sınır değer olan Mohr dairesine teğet çizilerek belirleneceğini ve bunun duraylılık hesaplamalarında iyimser sonuçlar verebileceğini önermiştir. Sonuç olarak, en küçük kareler yöntemi ile çizgisel bir Mohr-Coulomb ilişkisi kurularak ortalama bir kohezyon değerinin belirlenmesi daha uygun olabilir.

Hoek ve Brown [19] yenilme ölçütü ile ilgili daha önceki geliştirmeleri kapsamlı bir şekilde sunarak tüm çalışmaları bir araya getirme girişiminde bulunmuş ve çalışılmış birkaç örnek vererek pratik uygulamasını açıklamıştır.

Eşitliklerdeki değişikliklere ek olarak, Bieniawski'nin Kaya Kütle Puanlamasının yenilme ölçütü ile sahadaki jeolojik gözlemler arasındaki ilişkiyi kurmak için, özellikle çok zayıf kaya kütlelerinde, bu derecelendirmenin artık yeterli bir araç olmadığı kabul edilmiştir. Bu yetersizlik, Hoek vd. [14], Hoek [18] ve Hoek vd. [20] tarafından Jeolojik Dayanım İndeksi tanıştırılması ile sonuçlanmıştır. Daha sonra bu indeks zayıf kaya kütleleri için Hoek vd. [21], Hoek ve Marinos [9, 22], Marinos ve Hoek [22] ve Sonmez ve Ulusay [23]'in bir seri makalesinde genişletilmiştir.

### 2.2.1. Genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütü

Genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütü Eşitlik 2'deki gibi oluşturulmuştur:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2)$$

$m_b$  parametresi indirgenmiş bir değer olup malzeme sabiti  $m_i$  değerinden elde edilir ve aşağıdaki gibidir,

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (3)$$

$s$  ve  $a$  kaya kütlesi için sabitlerdir ve aşağıdaki ilişkiler olarak verilmiştir,

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (4)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}}\right) \quad (5)$$

$s$  sabiti, 0 ile 1 arasında değişebilir. Sağlam kaya için  $s$  sabiti değeri “1”dir. GSI ve  $D$  değeri kullanılarak bu değer indirgenir.  $a$  değeri de GSI değeri kullanılarak ayarlanan bir diğer sabittir.  $D$  değeri, örselenme katsayısıdır ve 0 ile 1 arasında değişir.

$\sigma_{ci}$  (sağlam kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı),  $m_b$ ,  $s$  ve  $a$  değerleri hesaplandığında, GSI sınıflamasına göre indirgenmiş yenilme ölçütü olan Genelleştirilmiş Hoek-Brown Yenilme Ölçütü oluşturulmuş olur.

Tek eksenli basma dayanımı, Eşitlik 2’de  $\sigma'_3 = 0$  alınarak hesaplanır ve aşağıdaki gibidir,

$$\sigma_c = \sigma_{ci} \cdot s^a \quad (6)$$

$\sigma_c$  = kaya kütlesi tek eksenli basınç dayanımı (MPa)

$\sigma_{ci}$  = sağlam kaya malzemesi tek eksenli basınç dayanımı (MPa)

ve kaya kütlesi çekme dayanımı ise,

$$\sigma_t = -\frac{s\sigma_{ci}}{m_b} \quad (7)$$

$\sigma_t$  = kaya kütlesi çekme dayanımı

Eşitlik 7, Eşitlik 2’de  $\sigma'_1 = \sigma'_3 = \sigma_t$  alınarak elde edilmiştir. Bu, çift eksenli çekme durumunu temsil eder. Hoek [15], gevrek malzemeler için tek eksenli çekme geriliminin çift eksenli çekme gerilimine eşit olduğunu göstermiştir.

Normal ve makaslama dayanımlarının asal gerilme ile ilişkileri Balmer [11] tarafından aşağıdaki şekilde verilmiştir,

$$\sigma'_n = \frac{\sigma'_2 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \cdot \frac{\frac{d\sigma'_1}{d\sigma'_3} - 1}{\frac{d\sigma'_1}{d\sigma'_3} + 1} \quad (8)$$

$$\tau = (\sigma'_1 - \sigma'_3) \frac{\sqrt{\frac{d\sigma'_1}{d\sigma'_3}}}{\frac{d\sigma'_1}{d\sigma'_3} + 1} \quad (9)$$

$$\frac{d\sigma'_1}{d\sigma'_3} = 1 + am_b \left( \frac{m_b \sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{a-1} \quad (10)$$

### 2.2.2. Deformasyon Modülü

Kaya kütlesi deformasyon modülü aşağıdaki gibidir [24],

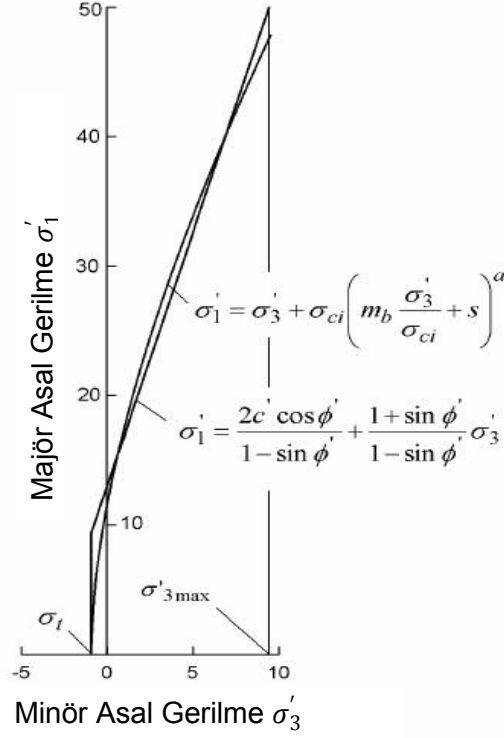
$$E_{rm}(MPa) = 100000 \left( \frac{1 - D/2}{1 + e^{\left( \frac{75 + 25D - GSI}{11} \right)}} \right) \quad (11)$$

Burada, Hoek ve Brown'ın [19] önerdiği orijinal formül  $D$  faktörü eklenerek patlatma hasarına ve gerilme rahatlamasına izin vermek için değiştirilmiştir.

### 2.2.3. Mohr-Coulomb Ölçütü

Birçok jeoteknik yazılım halen Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre yazıldığı için, eşdeğer sürtünme açıları ve kohezif dayanımın her bir kaya kütlesi ve gerilme aralığına göre belirlenmesi gerekmektedir. Bu, Şekil 2.1'de verildiği gibi, minör asal gerilmenin  $\sigma_1 < \sigma_3 < \sigma'_{3max}$  aralığında belirlenen değerlerle Eşitlik 2'nin çözümüyle oluşturulan eğriye, ortalama doğrusal bir ilişki yerleştirilerek yapılır. Eşitleme işlemi, Mohr-Coulomb grafiğinin üstündeki ve altındaki alanların dengelenmesini içerir. Bu, sürtünme açısı ( $\phi'$ ) ve kohezif dayanım ( $c'$ ) için Eşitlikler 12 ve 13 ile sonuçlanır [25],

$$\sigma_{3n} = \sigma'_{3max} / \sigma_{ci} \text{ iken,}$$



**Şekil 2.1.** Hoek-Brown ve eşdeğer Mohr-Coulomb ölçütü için majör ve minör asal gerilmeler arasındaki ilişki [25].

$$\phi' = \sin^{-1} \left[ \frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad (12)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}](s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1 + (6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1})/((1+a)(2+a))}} \quad (13)$$

Burada,  $\sigma'_{3max}$  değeri, Hoek-Brown ve Mohr-Coulomb ölçütü arasındaki ilişki göze alındığında, en yüksek yanıl basınç değeri'dir. Bu değeri tüm farklı durumlar için ayrı ayrı belirlenmelidir. Belirli bir normal gerilme ( $\sigma$ ) için, Mohr-Coulomb makaslama gerilimi ( $\tau$ ), aşağıdaki eşitlikteki  $c'$  ve  $\phi'$  değeri'nin yerine konması ile elde edilir.

$$\tau = c' + \sigma \tan \phi' \quad (14)$$

Majör ve minör asal gerilmelere dayanarak eşdeğer Eşitlik 15 aşağıdaki şekilde tanımlanır,

$$\sigma'_1 = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} + \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \sigma'_3 \quad (15)$$

#### 2.2.4. Kaya Kütle Dayanımı

Kaya kütlelerinin tek eksenli basınç dayanımı ( $\sigma_{cm}$ ) Eşitlik 6'da verilmiştir.  $\sigma_c$  değeri sınırdaki gerilimin aşımına sebep olduğunda kazı sınırında yenilme başlar. Yenilme, başlama noktasından çift eksenli gerilme alanına yayılır ve en sonunda lokal dayanım (Eşitlik 2'de tanımlanmıştır) tetiklenmiş gerilmeleri  $\sigma'_1$  ve  $\sigma'_3$  aştığında dengelenir. Çoğu sayısal model bu çatlak yayılım sürecini takip edebilir ve bu seviyedeki detaylı analizler kazının duraylılığı ve tahkimat sistemleri tasarımı açısından çok önemlidir [25].

Ancak, yukarıda bahsedilen detaylı yenilme yayılımı süreci yerine, kaya kütlelerinin tüm davranışlarının göz önünde bulundurulmasının daha kullanışlı olduğu zamanlar da mevcuttur. Örneğin, bir tahkimat sütununun dayanımı düşünüldüğünde sütunun çatlak yayılma derecesi yerine tüm kayanın dayanım tahmininin kullanımı daha kullanışlıdır. Bu da global “kaya kütle dayanımı” konseptine öncülük eder ve Hoek ve Brown [19] bunun Mohr-Coulomb ilişkisinden aşağıdaki şekilde tahmin edilebileceğini önermiştir.

$$\sigma'_{cm} = \frac{2c' \cos\phi'}{1 - \sin\phi'} \quad (16)$$

Verilmiş olan  $c'$  ve  $\phi'$ ,  $\sigma_t < \sigma'_3 < \sigma_{ci}/4$  gerilme aralığı için belirlenmiştir.

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \cdot \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s)) \left(\frac{m_b}{4} + s\right)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (17)$$

#### 2.2.5. $\sigma'_{3max}$ 'ın Belirlenmesi

Eşitlik 12 ve 13 kullanılarak  $\sigma'_{3max}$  için uygun değer belirlenmesi konusu, özel uygulamalara bağlıdır. Bunun için iki durum araştırılacaktır:

1) Tüneller - derin tünellerdeki çift yenilme ölçütü veya sığ tünellerin çökme profilleri için eşdeğer karakteristik eğrilerini veren  $\sigma'_{3max}$  değeri.

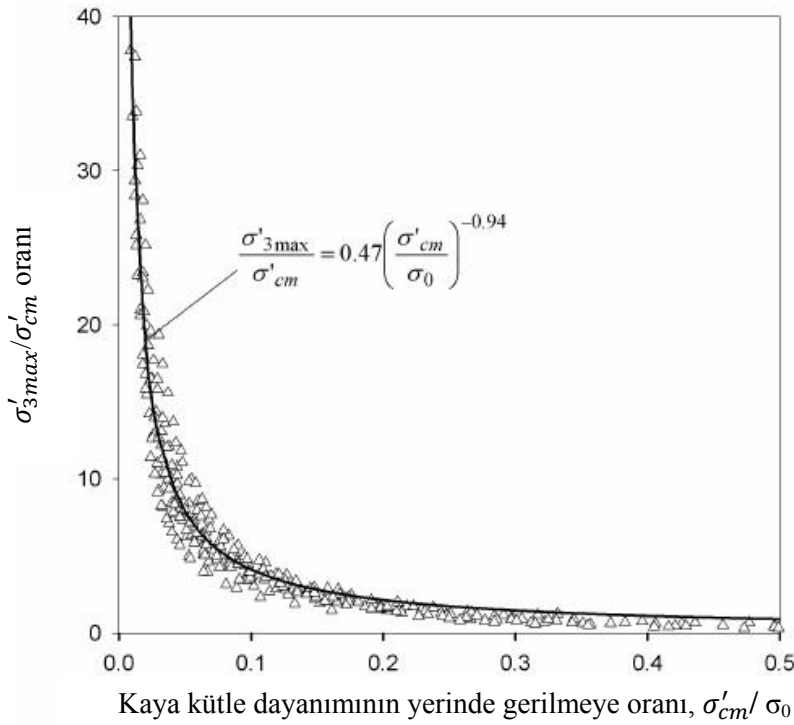
2) Şevler –burada hesaplanmış güvenlik faktörü, yenilme yüzeyinin şekli ve konumu eşdeğer olmalıdır.

Derin tünellerde, hem genelleştirilmiş Hoek-Brown hem de Mohr-Coulomb ölçütünde, yüzlerce çözüm yaratmak ve eşdeğer karakteristik eğrilerini veren  $\sigma'_{3max}$  değerini bulmak için kapalı form çözümler kullanılmaktadır [25].

Derin olmayan tünellerde ise yüzeyin altındaki derinlik üç tünel çapından azsa, yenilme boyutunun karşılaştırmalı sayısal çalışmaları ve yüzey çökme büyüklüğü için derin tüneller ile özdeş ilişkiler elde edilmiştir. Derin tüneller için yapılan çalışmaların sonuçları Şekil 2.2'de gösterilmiş ve her iki durum için de aşağıdaki Eşitlik yerleştirilmiştir [25]:

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0.47 \left( \frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.94} \quad (18)$$

Eşitlik 18'de tanımlanan  $\sigma'_{cm}$  kaya kütlesi dayanımı,  $\gamma$  kaya kütlelerinin birim ağırlığı ve  $H$  yüzey altındaki tünelin derinliğidir. Yatay gerilmenin dikey gerilmeden yüksek olduğu durumlarda,  $\gamma H$  değeri yerine yatay gerilme değeri kullanılmalıdır.



**Şekil 2.2.** Tünellerde  $\sigma'_{3max}$  değerinin hesaplanması için, eşdeğer Mohr-Coulomb ve Hoek-Brown parametrelerinin ilişkisi

Eşitlik 18, yüzeye kadar yayılmayan yenilme alanlarıyla çevrilmiş tüm yeraltı kazılarında uygulanır.

Madenlerde blok göçertme gibi problemler için yapılan çalışmalarda Hoek-Brown ve Mohr-Coulomb parametreleri ile ilişkili herhangi bir girişim yapılmaması ve malzeme



özelliklerinin belirlenmesi ve takip eden analizlerin bu ölçütlerden sadece birine dayandırılması önerilmiştir [25].

Şevler için yapılan benzer çalışmalarda, geniş aralığa sahip şev geometrileri ve kaya kütleleri özellikleri için Bishop'ın dairesel yenilme analizinin kullanımı aşağıdaki gibi verilmiştir  $H$  şev yüksekliği iken,

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0.72 \left( \frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.91} \quad (19)$$

### 2.3. Sıkışan Zemin Koşulları

Uluslararası Kaya Mekaniği Topluluğu tarafından belirtildiği gibi tünel etrafındaki kaya yapılarında zamana bağlı, eşik makaslama dayanımının aşımından dolayı oluşan büyük deformasyonlara sıkışma denir. Deformasyon, tünelin yapım aşamasında sonlanabilir veya uzun bir süre boyunca devam edebilir. Sıkışma davranışı genellikle mikaşist, kalkışist, grafitikşist, kıltaşı, killi şist, marnlı kil, vb. gibi düşük mukavemet özellikleriyle deforme olabilen zayıf kaya kütleleriyle ilgilidir [1].

Tünellerde oluşan sıkışma problemlerini belirlemek için bir dizi görgül ve yarı görgül çözümler bulunmaktadır. Görgül yaklaşımlar esas olarak tünel derinliği ve kaya kütle kalitesi ile sınıflandırma şemalarına dayanmaktadır. Bu yaklaşımlardan ikisi Singh vd. [4] ve Goel vd. [9]'ni içermektedir. Görgül ilişkiler, tünel derinliği ve kaya kütle kalitesi açısından tünellerdeki potansiyel sıkışma problemlerini belirlemeyi hedeflemektedir.

Yarı görgül yaklaşımlar ise zemin sıkışma potansiyelinin göstergesi olmaktadır. Bununla birlikte, hidrostatik gerilme alanı içindeki dairesel tünel için kapalı form çözümlerler kullanarak tünel etrafında beklenen deformasyonun ve/veya gereken tahkimat basıncının tahmin edilmesi için bazı araçlar sağlar. Kayadaki sıkışma potansiyelinin miktarını belirlemek için olan bu yöntemlerin çıkış noktası ise “yeterlilik faktörü” (competancy factor) nün kullanımınıdır. Bu yöntemlere verilebilecek başlıca iki örnek, Japonya'daki tünel deneyimlerine dayanarak Aydan vd. [5] yaklaşımı ve Hoek ve Marinos [10] yaklaşımıdır. Sıkışma ile ilgili olarak aşağıdakiler söylenebilir.

- Sıkışma davranışı, tünel etrafında çökme oluşabileceğini işaret eder. Tünel etrafındaki çökme bölgesinin başlangıcı tünelin konverjansında önemli bir artışı ve aynadaki yer değiştirmeleri (ekstrüzyon) belirler. Sıkışma davranışı, zaman içerisinde, yapısal olarak artış gösterir.

- Yataklanma düzlemleri ve şistoziteler gibi süreksizliklerin yönelimleri tünel etrafındaki büyük deformasyonların ve dolayısıyla sıkışma davranışının da, oluşumunda ve gelişiminde çok önemli bir rol oynar. Genel olarak, ana süreksizlik tünel eksenine paralel doğrultuda ise ayna ilerlemesindeki konverjanslarda da gözlemlendiği gibi deformasyon büyük ölçüde artar.
- Gözenek basınç dağılımı ve yapraklanmalar yüksekliğin kaya kütlesi gerilim-gerinim davranışını etkilediği gösterilmiştir. Drenaj önlemleri, piyezometrik yüksekliğin düşmesine ve hem tünel etrafında hem de tünel aynasının ilerisinde oluşabilecek deformasyonların engellenmesine yardımcı olur.
- Kazı ve tahkimat için kullanılan teknikler (kazı dizileri ve kazı aşamalarının sayısı), kazıdaki tüm duraylılık koşullarını etkileyebilir. Genel olarak, tünel çevresinde ve aynanın yakın çevresinde erken basınçların oluşması, zemin deformasyonlarının kontrolündeki en önemli faktörlerden biridir.

Kabarmaya elverişli kayalarda sıkışma ile bağlantılı büyük deformasyonlar oluşabilir. Her ikisi de aynı zamanda oluşup benzer etkiler göstereceği için sıkışma ve kabarmayı birbirinden ayırt etmek oldukça zordur. Örneğin, aşırı konsolide killerde, tünel kazısından kaynaklanan hızlı gerilim azalması, deviatorik gerilmenin artmasıyla negatif gözenek basıncının da başlamasına sebep olur. Drenajsız koşullarda, zemin gerilimleri sıkışmaya neden olmayabilir. Ancak, negatif gözenek basıncından dolayı, sabit yükleme koşulları altında aniden başlayan deformasyonla kabarma oluşabilir. Bu yüzden, eğer kabarma erken ters yükleme ile kontrol edilebiliyorsa, gerilim artması ile olası bir sıkışma başlayabilir.

### **2.3.1. Sıkışma Koşullarının Belirlenmesi ve Nicelleştirilmesi**

Tünelcilikte bir dönüm noktası olan Karl Terzaghi'nin [2] "Kaya kusurları ve tünel tahkimatlarındaki yükler" makalesinde, sıkışan kayaların tanımı şu şekildedir: "Sıkışan kayalar, önemli miktarda kil içeren kayalardır. Kil, şeylin içinde bulunduğu gibi orijinal olarak bulunabilir ya da alterasyon ürünü olabilir. Kaya, mekanik olarak bozulmamış, çatlaklı veya ezilmiş olabilir. Kayanın içindeki kil fraksiyonunda kaolinit grubunun zararsız üyeleri ya da montmorillonitlerin kötü özellikleri baskın olabilir. Bu yüzden, sıkışan kayanın özellikleri, içerisindeki kile göre çeşitlilik göstermektedir." "Belirli bir alanda önerilen tünelin yapımı için beklenen basıncı ve çalışma koşullarını kavraması için tüneli inşa edecek kişiyi gereken adımlar konusunda bilgilendirmek" amacıyla, Terzaghi

sıkışan kayaların davranışsal açıklamasını şu şekilde verir: “Sıkışan kayalar tüneller içerisinde fark edilebilir bir hacim artışı olmadan yavaşça ilerler. Yüksek oranda mikroskobik ve alt-mikroskobik mikalı mineral parçacıkları veya düşük şişme kapasiteli kil mineralleri sıkışmanın ön şartıdır.”

Yukarıdaki tanımlamaya göre, ”kaya yükü” (9 m’den geniş tüneller için uygulanamaz) için belirli aralıktaki değerler Terzaghi’nin kaya kütle sınıflandırmasında sıkışmayla ilişkilendirilerek Çizelge 2.1.’de verilmiştir:

**Çizelge 2.1:** Terzaghi’nin kaya kütle sınıflandırması

	Kaya Durumu	Tünelin 1 metresinde kullanılan tahkimatın üzerindeki kaya yükü $H_p$ , tünellerin uzunluğu $m$
Sınıf 7	Sıkışan kaya, orta derinlik	(1.10 - 2.10) (B+H <sub>t</sub> )
Sınıf 8	Sıkışan kaya, büyük derinlik	(2.10 - 4.50) (B+H <sub>t</sub> )

$B$  (m) ve  $H_t$  (m)’nin sırasıyla genişlik ve yükseklik olduğu tünellerde, derinlik  $1.5 (B+H_t)$ ’den fazla olur.

Yukarıdaki bilgiler kaya mekaniği ve tünellerde, başlangıç tahkimatının yükü açısından kayaların sıkışma potansiyelinin ‘miktarının belirlenmesi’ için ortaya konulan ilk çalışmadır. Değişik yazarlar tarafından, Terzaghi’yi takip eden, yaşanmış deneyimlere ve belgelenmiş vakalara dayanan, sıkışan kaya koşullarını ve potansiyel tünellerde sıkışma problemlerini belirlemek için bir takım yaklaşımlar önerilmiştir. Tünellerde projelerinde, aşağıda tartışıldığı gibi, bu problemleri aşmak için değerlendirilebilecek olası çözümleri belirleme girişimi yapılmıştır.

### 2.3.2. Görgül Yaklaşımlar

Görgül yaklaşımlar esas olarak sınıflandırma şemalarına dayanmaktadır. Bu yaklaşımlardan ikisi Singh vd. [4] ile Goel vd. [9] yaklaşımlarıdır.

### 2.3.2.1. Singh vd. [4] Yaklaşımı

Sıkışan zemin durumları ile sıkışmayan zemin durumlarını ayırmak için 39 adet ayrı olaydan toplanmış kaya kütle kalitesi  $Q$  [26] ve örtü tabakası  $H$  verileriyle, Singh vd. [4] net bir sınır grafiği çizmiştir (Şekil 2.3).

Grafikteki bu çizginin eşitliği:

$$H = 350 Q^{1/3} [m] \quad (20)$$

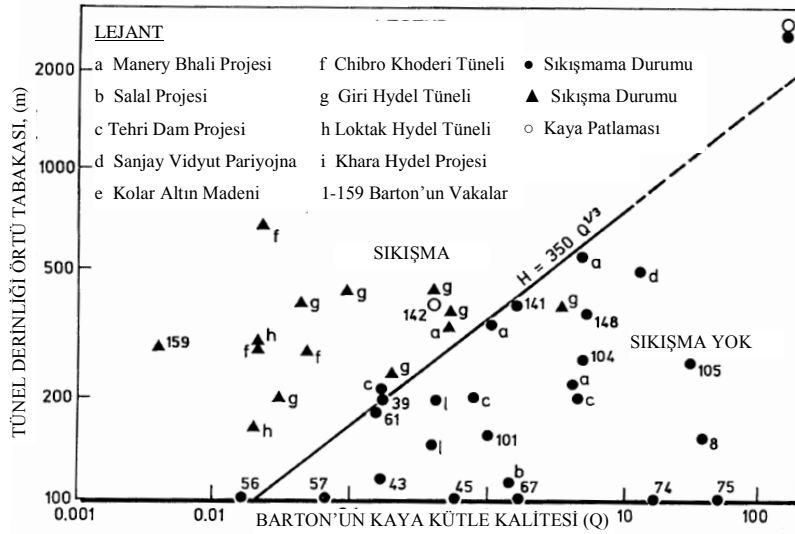
Çizginin üzerinde kalan veriler sıkışma koşullarını, altında kalan veriler ise sıkışmama koşullarını temsil eder. Bu durum aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Sıkışma koşulları için:

$$H \gg 350 Q^{1/3} [m] \quad (21)$$

Sıkışmama koşulları için:

$$H \ll 350 Q^{1/3} [m] \quad (22)$$



Şekil 2.3. Sıkışan zeminlerin tahmini yaklaşımı [4]

Kaya kütlesi ile birlikte tek eksenli basma dayanımı,  $\sigma_{cm}$ :

$$\sigma_{cm} = 0.7 \gamma Q^{1/3} [MPa] \quad (23)$$

$\gamma$  = kaya kütlesi birim ağırlığıdır.

### 2.3.2.2. Goel vd. [9] Yaklaşımı

Kaya kütlesi  $N$ 'e dayanarak Goel vd. [9] tarafından basit bir görgül yaklaşım geliştirilmiştir. Kaya kütlesi  $N$ , gerilme olmayan  $Q$  olarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$N = (Q)_{SRF} = I \quad (24)$$

Barton vd. [26]'de geçen  $SRF$  parametresinin doğru değerlendirilebilmesi için oluşabilecek belirsizlik ve problemlerden kaçınmak için  $N$  kullanılır. Goel vd. [9] tünel uzunluğunu  $H$ , tünel çapını  $B$ , ve kaya kütle numarasını  $N$  alarak, 99 tünel kesitinden yararlanmış,  $N$  ve  $H \times B^{0.1}$  arasındaki uygun verileri log-log diyagramına dökmüştür (Şekil 2.4). Aynı Şekil 2.4'te gösterildiği gibi, sıkışma ve sıkışmama durumlarını birbirinden ayıran bir çizgi vardır.

Grafikteki bu çizginin eşitliği:

$$H = (275 N^{0.33}) B^{-1} [m] \quad (25)$$

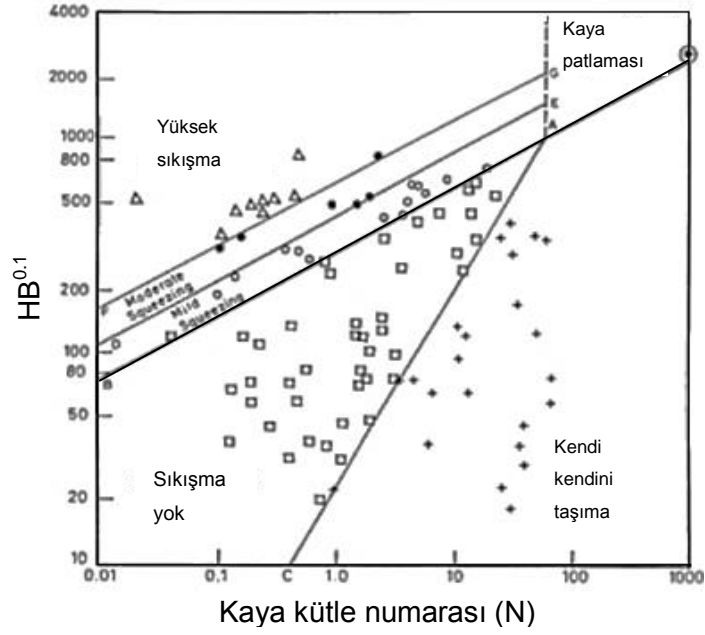
Çizginin üzerinde kalan veriler sıkışma koşullarını, altında kalan veriler ise sıkışmama koşullarını temsil eder. Bu durum aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Sıkışma koşulları için:

$$H \gg (275 N^{0.33}) B^{-1} [m] \quad (26)$$

Sıkışmama koşulları için:

$$H \ll (275 N^{0.33}) B^{-1} [m] \quad (27)$$



Şekil 2.4. Sıkışan zeminlerin tahmini yaklaşımı [9]

### 2.3.2.3. Sıkışma Derecesi

Sıkışma derecesi Singh vd. [4] ve Goel vd. [9]'nin yaklaşımlarına göre tünel konverjansı ile aşağıdaki gibi sunulmuştur:

- |                      |                            |
|----------------------|----------------------------|
| (i) Hafif sıkışma    | konverjans 1-3% tünel çapı |
| (ii) Orta sıkışma    | konverjans 3-5% tünel çapı |
| (iii) Yüksek sıkışma | konverjans >5% tünel çapı  |

### 2.3.3. Yarı-Görgül Yaklaşımlar

Görgül ilişkiler, tünel derinliği ve kaya kütle kalitesi açısından tünellerdeki potansiyel sıkışma problemlerini belirlemeyi hedeflemektedir ( $Q$  veya  $(Q)_{SRF=1}$  olarak kullanılmaktadır). Yarı görgül yaklaşımlar sıkışma potansiyelinin göstergesi olmaktadır. Bununla birlikte, hidrostatik gerilme alanı içindeki dairesel tünel için kapalı form çözümlerler kullanarak tünel etrafında beklenen deformasyonun ve/veya gereken tahkimat basıncının tahmin edilmesi için bazı araçlar sağlar. Kayadaki sıkışma potansiyelinin miktarını belirlemek için olan bu yöntemlerin çıkış noktası ise “yeterlilik faktörü” nün kullanımınıdır. Yeterlilik faktörü, kaya/kaya kütlelerinin tek eksenli basma dayanımının ( $\sigma_c/\sigma_{cm}$ ), örtü tabakası basıncına ( $\gamma H$ ) oranı olarak tanımlanmıştır. Bu yöntemlerden üçü aşağıda tartışılmıştır [1].

### 2.3.3.1. Jethwa vd. [27] yaklaşımı

Sıkışma derecesinin belirlenmesi amacıyla, Jethwa vd. [27] tarafından Eşitlik 28 kullanılarak Çizelge 2.2'deki gibi bir sınıflandırma önerilmiştir.

$$N_c = \frac{\sigma_{cm}}{p_0} = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma H} \quad (28)$$

$\sigma_{cm}$  =kaya kütlesi tek eksenli basma dayanımı

$p_0$  =yerinde gerilme

$\gamma$  =kaya kütlesi birim ağırlığı

H =yüzeyin altında tünel derinliği

$N_c$  =sıkışma derecesi

**Çizelge 2.2:** Jethwa vd. [27]'e göre sıkışma davranışı sınıflandırması

$\sigma_{cm}/p_0$	Davranış biçimi
< 0.4	Yoğun sıkışma
0.4 - 0.8	Orta sıkışma
0.8 - 2.0	Hafif sıkışma
> 2.0	Sıkışma yok

Hidrostatik gerilim alanı altındaki dairesel tünel için kapalı form çözümler ve yerinde gözlem verisi kullanılarak, tünel astarı üzerindeki temel kaya basıncı ( $p_u$ ) tanımı aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$\frac{p_u}{p_0} = D \cdot M_\phi (1 - \sin\phi) \left(1 - \frac{\sigma_{cm}}{2p_0}\right) \quad (29)$$

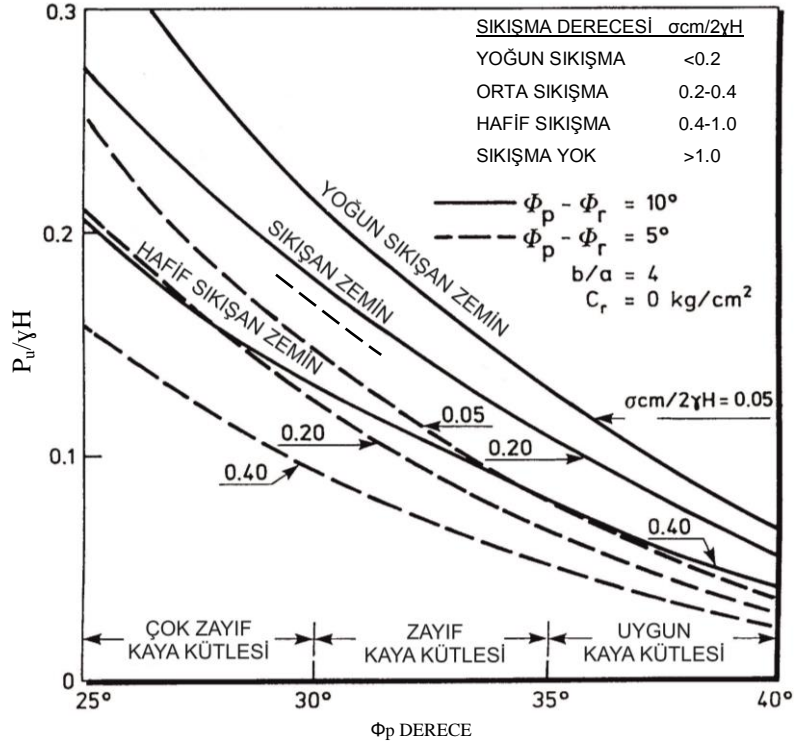
$$D = \frac{\left(\frac{R_c}{R}\right)^\alpha - \left(\frac{R}{R_c}\right)^2}{1 - \left(\frac{\alpha}{R_c}\right)^2} \quad (30)$$

$$M_{\phi} = \left(\frac{R}{R_{\rho 1}}\right)^{\alpha} \quad (31)$$

$$\sigma_{cm} = \frac{2c_{\rho} \cos \phi_{\rho}}{1 - \sin \phi_{\rho}} \quad (32)$$

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi_r}{1 - \sin \phi_r} \quad (33)$$

$R$ = tünel yarıçapı;  $R_c$ = tünel astarıyla temas eden sıkışma yüzeyinin yarıçapı;  $R_{\rho 1}$  = plastik bölge yarıçapı;  $c_{\rho}$ ,  $c_r$  ve  $\phi_{\rho}$ ,  $\phi_r$  = kaya kütlesi kohezyon ve sürtünme değerleri. Şekil 2.5'te gösterildiği gibi, değişik  $\sigma_{cm} / 2\rho_0$  ve kalıcı sürtünme açısı ( $\phi_r$ ) değerleri için,  $\rho_u / \rho_0$  oranına karşılık ( $\phi_p$ ) grafiğinde, atık kohezyon ( $c_r$ ) her zaman sıfıra eşittir.



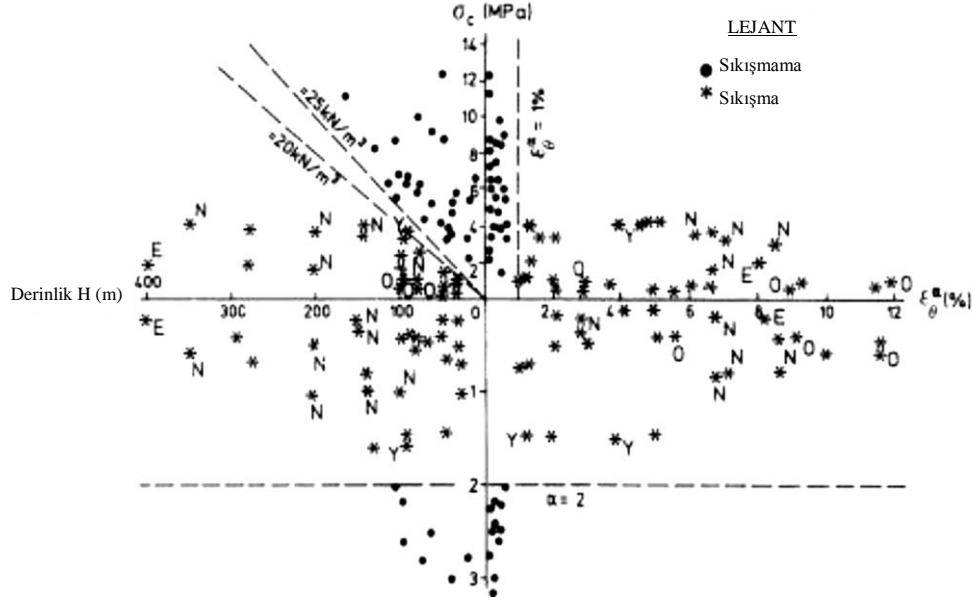
Şekil 2.5. Sıkışma koşullarının tahmini [27]

### 2.3.3.2. Aydan vd. [5] Yaklaşımı

Aydan vd. [5], Japonya'daki tünel deneyimlerine dayanarak, sağlam kayanın tek eksenli basma dayanımı ( $\sigma_{ci}$ ) ile kaya kütlesinin tek eksenli basma dayanımının ( $\sigma_{cm}$ ) aynı olduğunu ifade ederek, sağlam kaya mukavemetiyle ( $\sigma_{ci}$ ) örtü tabakası basıncını ( $\gamma H$ ) ilişkilendirmeyi önermiştir. Japonya'daki sıkışan kayalı tünellerde yapılan çalışmalardan



elde edilen veriler Şekil 2.6'da verilmiştir. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi,  $\sigma_c/\gamma H$  oranı 2.0'dan küçük ise sıkışma koşulları oluşmaktadır.



Şekil 2.6. Aydan vd. [5] Önerilen sıkışma koşullarının tahmini yaklaşımı

Bu yöntem temelde laboratuvar testlerindeki gerilim-birim deformasyon tepkisi ile tünel etrafındaki teğetsel gerilim-birim deformasyon tepkisinin benzerliğine dayanmaktadır.

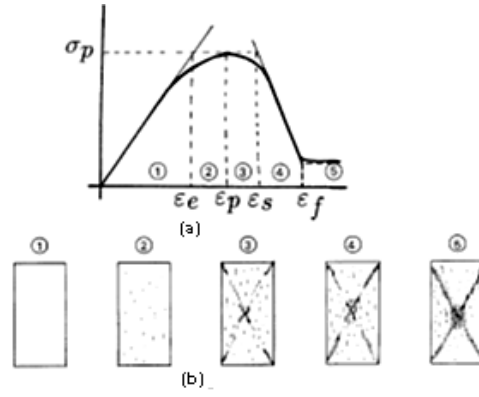
Şekil 2.7'de gösterildiği gibi, düşük sınırlayıcı gerilim  $\sigma_3$  ( $\sigma_3 \leq 0.1\sigma_{ci}$ ) altında, yüklenme esnasında numunenin beş farklı hali gözlemlenmiştir. Normalize edilmiş birim deformasyon düzeylerini ( $\eta_p$ ,  $\eta_s$  ve  $\eta_f$ ) veren ilişkiler aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$\eta_p = \frac{\epsilon_p}{\epsilon_e} = 2\sigma_{ci}^{-0.17} \quad (34)$$

$$\eta_s = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_e} = 3\sigma_{ci}^{-0.25} \quad (35)$$

$$\eta_f = \frac{\epsilon_f}{\epsilon_e} = 5\sigma_{ci}^{-0.32} \quad (36)$$

$\epsilon_p$ ,  $\epsilon_s$  ve  $\epsilon_f$  Şekil 2.7'de gösterilen birim deformasyon değerleri,  $\epsilon_e$  ise elastik birim deformasyon limitidir.



**Şekil 2.7.** İdealize edilmiş gerilim-birim deformasyon eğrisi ve sıkışan kayaların bununla ilgili halleri [5]

Kapalı form çözüme dayanan, hidrostatik gerilme alanındaki dairesel tünel etrafı birim deformasyon düzeyini ( $\varepsilon_{\theta}^a$ ) hesaplamak için geliştirilen beş farklı sıkışma derecesi, beklenen tünel davranışları ile birlikte Çizelge 2.3'te verilmiştir.

**Çizelge 2.3:** Aydan vd. [5] yaklaşımına göre sıkışma davranışlarının sınıflandırılması

Sınıflandırma no.	Sıkışma derecesi	Sembol	Teorik ifade	Tünel davranışı için yorumlar
1	Sıkışma yok	NS	$\varepsilon_{\theta}^a / \varepsilon_{\theta}^e \leq 1$	Kaya elastik davranış gösterir ve ayna etkisi sona erdiğinde tünel duraylı kalır.
2	Hafif sıkışma	LS	$1 \leq \varepsilon_{\theta}^a / \varepsilon_{\theta}^e \leq \eta_p$	Kaya gerilime karşı güç gösterir. Sonuç olarak, tünel duraylı kalır ve ayna etkisi sona erdiğinde yer değiştirme sona erer.
3	Orta sıkışma	FS	$\eta_p \leq \varepsilon_{\theta}^a / \varepsilon_{\theta}^e \leq \eta_s$	Kaya gerilime karşı yumuşar ve uzanım daha büyük olur. Ancak, ayna etkisi tamamlandığında yer değiştirmeler de sona erer.
4	Yoğun sıkışma	HS	$\eta_s \leq \varepsilon_{\theta}^a / \varepsilon_{\theta}^e \leq \eta_f$	Kaya gerilime karşı yüksek derecede yumuşama gösterir. Ardından, yer değiştirme daha büyük olur ve ayna etkisi sona erdiğinde yakınsama olmaz.
5	Çok yoğun sıkışma	VHS	$\eta_f \leq \varepsilon_{\theta}^a / \varepsilon_{\theta}^e$	Kayalar kayar, çökme meydana gelir ve yer değiştirme çok büyük olur. Tünel girişini kazmak ve sağlam tahkimatlar kullanmak gerekir.

Not:  $\eta_p$ ,  $\eta_s$  ve  $\eta_f$  için Eşitlik 34, 35 ve 36'ya bakınız;  $\varepsilon_{\theta}^a$  hidrostatik gerilme alanındaki dairesel tünel etrafındaki teğetsel birim deformasyondur ayrıca;  $\varepsilon_{\theta}^e$  kaya kütlesi için elastik birim deformasyon limitidir.

### 2.3.3.3. Hoek ve Marinos [10] Yaklaşımı

Hoek [28] potansiyel tünel sıkışma problemlerinin göstergesi olarak kaya kütlesi tek eksenli basma dayanımının ( $\sigma_{cm}$ ), yerinde gerilmeye ( $p_0$ ) oranını kullanmıştır. Özellikle, Hoek ve Marinos [10] tünel birim deformasyonunun ( $\varepsilon_t$ ) (daireseel tünel duvarındaki yer değiştirmenin tünel çapına yüzde oranı olarak tanımlanmıştır) ( $\sigma_{cm}/p_0$ ) oranına karşı grafiğinin sıkışma koşullarındaki tünel problemlerini etkili bir şekilde belirleyebilmek için kullanıldığını göstermiştir.

Hoek ve Marinos [10] gevşek kayalı tünel etrafındaki kayaların kütle birim deformasyon yüzdesini aşağıdaki eşitlikle belirlemiştir:

$$\varepsilon_t = 0.2 \left( \frac{\sigma_{cm}}{p_0} \right)^{-2} \quad (37)$$

Birim deformasyon yüzdesi ( $\varepsilon$ ) tünel kapanması/tünel çapı x100 olarak tanımlanmıştır.  $\sigma_{cm}$  kaya kütlesinin tek eksenli basma dayanımıdır.  $p_0$  ise, yüzey derinliği ve kaya kütlesinin birim ağırlılığının ürünü olarak belirlenen yerinde gerilmedir.

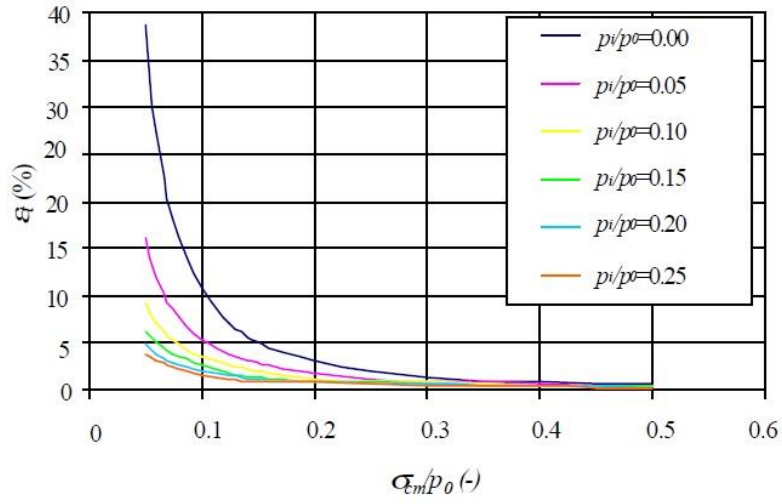
Benzer biçimde, sıkışan kaya koşullarında ilerleyen tünel aynası davranışının kontrolündeki önemi fark ederek, ayna birim deformasyonu ( $\varepsilon_f$ ) (eksenel ayna yer değiştirmesinin tünel yarıçapına yüzde oranı olarak tanımlanmıştır) için Hoek [28] aşağıdaki yaklaşık ilişkiyi vermiştir:

$$\varepsilon_f = 0.15 \left( \frac{\sigma_{cm}}{p_0} \right)^{-2} \quad (38)$$

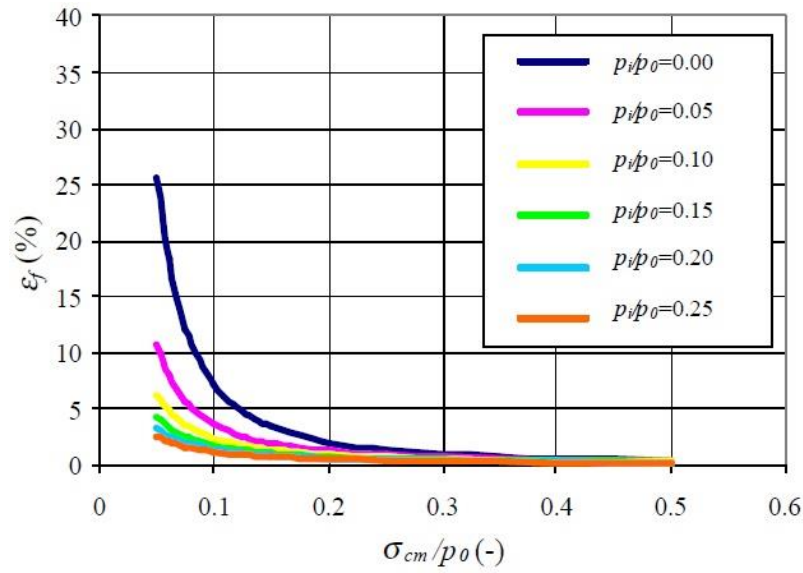
Plastik bölge çapının ( $d_p$ ) tünel çapına ( $d$ ) oranı Eşitlik 39'da verilmiştir. Bu analizlerin yatay ve dikey yerinde gerilmelerinin eşit olduğu varsayımına dayandırıldığı unutulmamalıdır. Bu varsayım, yüksek makaslama gerilimini sürdürmeyecek çok zayıf kayalar için kabul edilebilir. Öyle ki, jeolojik zaman içerisinde, anizotropik yerinde gerilmeler eşitlenme eğiliminde olacaktır.

Eşitlik 37 ve 38'de önerilen formüllerin tünel etrafındaki ve aynasındaki birim deformasyonu ( $\varepsilon_t$  ile  $\varepsilon_f$ ) ile tahkimat basıncı ( $p_i$ ), farklı  $\sigma_{cm}/p_0$  değer aralıkları için şekil 2.8'de verilmiştir.

$$\frac{d_p}{d} = 1.25 \left( \frac{\sigma_{cm}}{p_0} \right)^{-0.57} \quad (39)$$



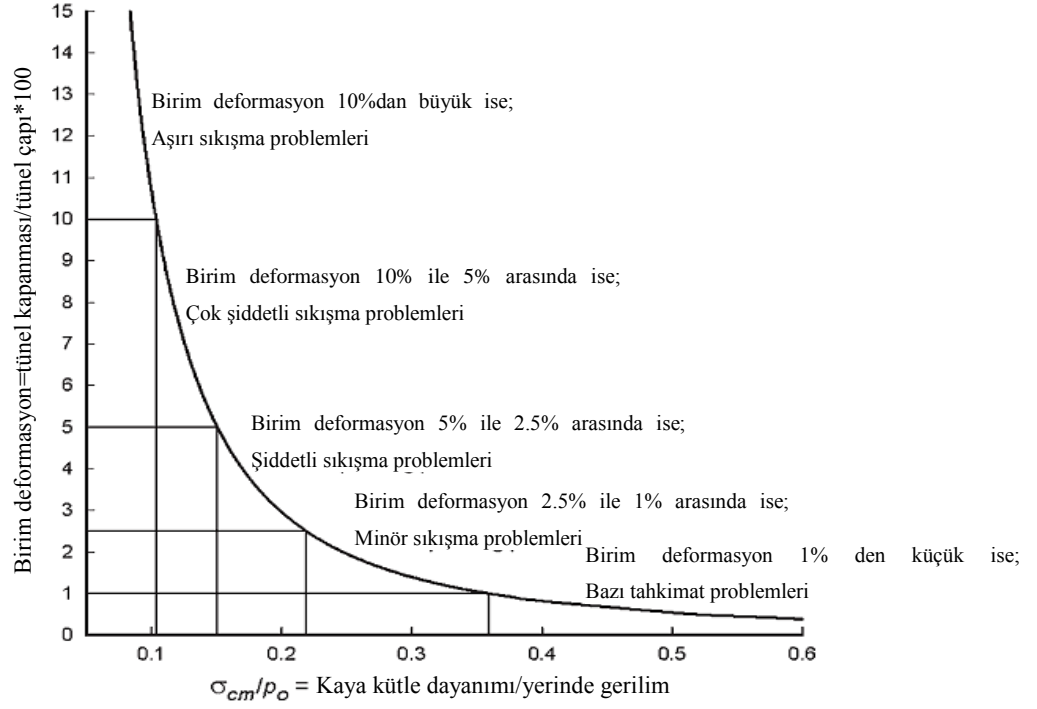
(a)



(b)

**Şekil 2.8.**  $\sigma_{cm}/p_0$  değer aralıkları için (a) tünel birim deformasyonu  $\varepsilon_f$ ; (b) ayna birim deformasyonu  $\varepsilon_f$  ile tahkimat basıncı  $p_i$ , grafikleri

Yukarıdaki temel bilgiler ile Venezuela, Tayvan ve Hindistan'daki bir dizi vakayı göz önünde bulundurarak, Hoek [28] Şekil 2.9'daki eğriyi tünel sıkışma problemlerinin ilk tahmini için kullanılmak üzere ortaya koymuştur. Aydan vd. [5]'nin daha önce belirttiği sıkışma koşullarının sınıflandırılmasının Hoek [28] ile karşılaştırmalı kıyaslaması, beklenen tünel gerilmeleri için Çizelge 2.4'te verilmektedir.



Şekil 2.9. Hoek [28] tarafından önerilen sıkışma davranışının sınıflandırılması

Çizelge 2.4: Sıkışma davranışlarının Hoek [28] ve Aydan vd. [5]'ne göre karşılaştırmalı sınıflandırılması

Sınıflandırma No.	Aydan vd. [5]		Hoek [28]	
	Sıkışma Derecesi	Tünel Birim Deformasyonu (%)	Sıkışma Derecesi	Tünel Birim Deformasyonu (%)
1	Sıkışma yok	$\varepsilon_{\theta}^a \leq 1.0$	Bazı tahkimat sorunları	$\varepsilon_t \leq 1.0$
2	Hafif sıkışma	$1.0 < \varepsilon_{\theta}^a \leq 2.0$	Hafif sıkışma	$1.0 < \varepsilon_t \leq 2.5$
3	Orta sıkışma	$2.0 < \varepsilon_{\theta}^a \leq 3.0$	Şiddetli Sıkışma	$2.5 < \varepsilon_t \leq 5.0$
4	Yoğun sıkışma	$3.0 < \varepsilon_{\theta}^a \leq 5.0$	Çok şiddetli sıkışma	$5.0 < \varepsilon_t \leq 10.0$
5	Çok yoğun sıkışma	$\varepsilon_{\theta}^a \leq 5.0$	Aşırı sıkışma	$\varepsilon_t > 10.0$

## 2.4. Kaya Kütlesi Mukavemetindeki Belirsizlikler

Yarı görgül yaklaşımlara dayanan sıkışma davranışlarının belirlenmesi ve nicelleştirilmesi, kaya kütlesi tek eksenli basma dayanımını ( $\sigma_{cm}$ ) belirlemeyi zorunlu kılmaktadır. Örneğin eğer  $\sigma_{cm}/p_0$  oranı biliniyorsa, Hoek [10]'e göre, çok çeşitli koşullar için, tünel birim deformasyonu ( $\varepsilon_t$ ) ve ayna birim deformasyonu ( $\varepsilon_f$ ) 37 ve 38' nolu eşitlikler kullanılarak tahmin edilebilir [1].

Yaklaşım, sıkışma koşullarından kaynaklanan potansiyel tünelcilik sorunlarının tahmininde kullanışlı olmasına rağmen, daha gelişmiş analiz yöntemlerinin alternatifi değildir. Ancak, bu düşünceyle bile, güven telkin eden kaya kütle özelliklerinin seçimi hala zordur.  $\sigma_{cm}$ 'nin tahmini için Hoek ve Marinos [10]'un önerdiği Eşitlik kullanılabilir:

$$\sigma_{cm} = (0.0034m_i^{0.8})\sigma_{ci}[1.029 + 0.25e^{(0.1m_i)}]^{GSI} \quad (40)$$

Çoğu durumda, sıkışma davranışı gösteren kaya kütleleriyle uğraşırken,  $\sigma_{ci}$  ve  $m_i$ 'nin değerlendirilmesi, laboratuvar testleri için sağlam kaya numunesi elde etme açısından oldukça zor olabilir. GSI indeksinin değerlendirilmesi tünel aynasındaki, yüzey kazısındaki ve sondaj karotlarındaki kaya kütlelerinin görsel incelenmesine dayanmaktadır. Bununla birlikte, şiddetli sıkışma sorunlarına maruz kalmış tünellerde, bu oldukça zor ve öznelidir.

## 2.5. Sayısal Analiz

Sayısal analizler  $\sigma_{cm}/p_0$  oranının 0.3'ün altında olduğu durumlarda tavsiye edilebilir. Bu oran 0.15'in altına düştüğünde, tünelin duraylılığı kritiklediğinde, sayısal analiz şiddetle tavsiye edilir [1]. Yapımı sırasında tüneli duraylı hale getirmek için çok karmaşık tahkimat/kazı dizileri, uygulanacak ön-tahkimat/stabilizasyon önlemleri vb. dahil olmak üzere önemli avantajlar tasarım aşamasında sayısal analizler kullanılarak öngörülmektedir.

Tünel deformasyon ve gerilim analizleri için kullanıma uygun çok güçlü kodlar geliştirilmiştir. Bu nedenle tünel davranışları için, uygulamada gözlenen gerçek olaylara uygun bir anlayışın sağlandığı, güvenilir tahminler geliştirmek mümkündür. Aynanın hemen yakınında, astar yerleştirme gecikmesi vb. sonucu oluşan kapalı-form çözümler ile ilgili olarak, birden fazla kazı aşamaları, ayna ilerleme etkisi ve önemli üç boyutlu koşullar ile birlikte izotropik olmayan yerinde gerilim alanları şu anda göz önünde bulundurulabilir [1].

### **2.5.1. Sürekli Ortamlar Yaklaşımı**

Eğer eşdeğer sürekli ortamlar yaklaşımı kaya kütlelerinin mukavemet ve deformasyon için her yönde sürekli homojen özelliklere sahip olduğu varsayılarak kullanıldıysa, kaya kütlesi için belirli bir temel eşitlik elastik, elasto-plastik, visko-elastik, elastik-visko-plastik gibi alan yöntemleri olarak tanımlanmıştır. Bu düzenleme ile, sonlu elemanlar (FEM) yöntemleri (örneğin Plaxis2D veya 3D) ve sonlu farklar (FDM) yöntemleri (örneğin FLAC2D veya 3D) de dâhil olmak üzere çeşitli sayısal çözümler kullanılabilir [1].

Sıkışan kaya koşullarındaki tünel analiz ve tasarımında kullanılan sayısal yöntemlerin açıkça görülen avantajlarından bir tanesi, kaya kütleleri için birim deformasyon yumuşatıcı davranışlar ve zamana bağlı davranışlar gibi daha karmaşık gerilim-birim deformasyon modelleri kullanmasıdır. Bu yöntemler hem FEM hem de FDM’de uygulanabilir. Sayısal modellemenin bir diğer avantajı ise daha karmaşık geometrideki tünelleri (örneğin, dairesel olmayan) veya çeşitli tünel astarlama düzenlemelerini dâhil etme yeteneğidir [1].

### **2.5.2. Süreksiz Ortamlar Yaklaşımı**

Sıkışma davranışı gösteren zayıf kaya kütlelerinde, sürekli ortamların kullanımı ortamın kazıya bağlı olmasının uygunluğunu temsil eder. Genel olarak, elde edilen sonuçlar, mühendislik muhakemesi yapılarak ve emsal deneyimler kullanılarak, pratikte başarıyla uygulanabilir tünel tasarımlarıdır. Ancak, bazı durumlarda verilen problemi analiz etmek için süreksiz ortamlar modellemesi en uygun yaklaşım olabilir. Örneğin, tünel eksenine neredeyse paralel olarak ilerleyen yataklanma ile kesişen, kaya kütlesi arjilit. Neredeyse dikey bir süreksizlik sistemi de mevcuttur. Hem yataklanma, hem de kesişme çok yakın boşluklu ve kalıcıdır, bu yüzden kaya kütlesi çok küçük bloklara ayrılmıştır. Kaya kütlesi davranışını simüle etmek için, Ayrık Eleman Yöntemi (DEM) ve Evrensel Ayrık Eleman Kodu’nu (UDEC) kullanarak, Ayrık Özellik Ağı (DFN) modeli oluşturulur [1].

### 3. SAYISAL MODELLEME

Bu bölümde, Hoek ve Marinos [10]'un yarı görgül yaklaşımı, GSI, UCS,  $m_i$  ve H olmak üzere Hoek ve Brown dört farklı değişken parametreleri, kendine özgü birkaç hipotetik tünel kazısında sıkışma seviyelerinin belirlenmesi için kullanılmıştır. Ayrıca, yarı görgül yaklaşımların gelişimi için sonlu farklar yöntemi kullanılarak, FLAC<sup>3D</sup> programı ile sayısal analizler uygulanmıştır. Her iki yaklaşım için de bütün modellerde plastik yarıçap hesaplanmış ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

#### 3.1. Sayısal Yaklaşım

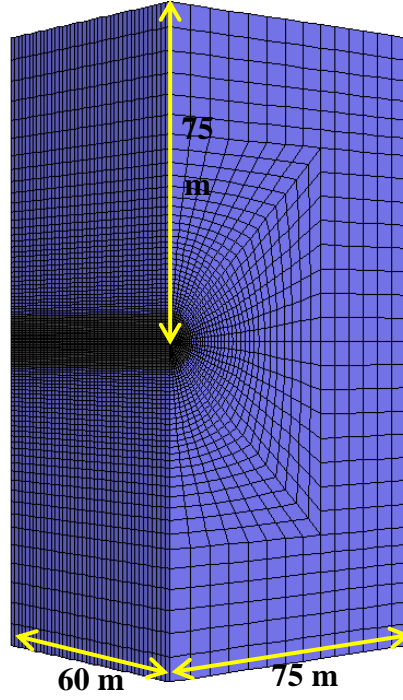
Üç boyutlu sayısal analizler için, FLAC<sup>3D</sup> programı (Fast Lagrange Analysis of Continua in Three Dimensions) kullanılmıştır. Analizler sırasında, simüle edilmiş dairesel bir tünel etrafındaki zayıf kaya kütlelerindeki ve sıkışan zeminlerdeki büyük deformasyonlara bağlı olarak oluşacak sayısal dengesizliklerin yol açacağı sorunları engellemek amacıyla bu yöntem uygun görülmüştür. Program, Peter Cundhall tarafından geliştirilmiş ve daha sonra Itasca Consulting Group şirketi tarafından ticari yazılım olarak dağıtılmıştır [29].

#### 3.2. Sayısal Model

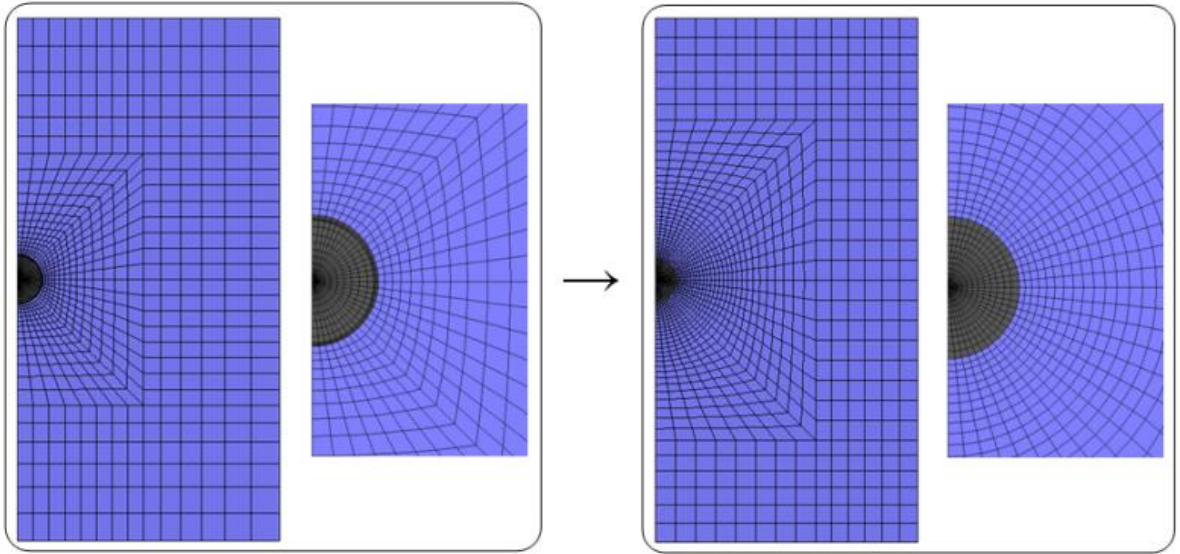
Parametrik çalışma için üç boyutlu hipotetik bir model geliştirilmiştir. Bu model, kaya kütlelerinin izotropik malzeme özellikleri göz önünde bulundurularak kullanılmıştır. Sayısal modeldeki yer değiştirme ve gerilme büyüklüğündeki köşe etkisini önlemek için, tünelin ilerleme yönünde, tünel aynasından ucuna kadar olması gereken mesafeyi belirlemek için parametrik bir çalışma yapılmıştır. Elde edilen ilk sonuçlar, tünel aynasında tünel çapından 2.5 kat daha büyük olan uzaklıklarda (sert kayalarda) ve 4 kat daha büyük olan uzaklıklarda (zayıf kayalarda) köşe etkisinin önlenmesi gerektiğini göstermiştir. Bu araştırmada, kenar veya köşe etkisini önlemek için, tünel aynasına tünelin çapından 5 kat daha büyük uzunluklar gerektiği bulunmuştur. Üç boyutlu blok model ve ilgili boyutlar Şekil 3.1'de verilmiştir. Modelin izometrik görüntüsü; yatay (x), boylamsal (y) ve dikey (z) yönlerinde sırasıyla 75, 60 ve 150 m'dir. Tünel kazısı 1 m aralıklarla yapılmıştır. Model, her 1m'lik kazıdan sonra tünel etrafındaki dengesiz kuvvetler dengeye gelene kadar çalıştırılmıştır. Daha sonra diğer kazı işlemleri aynı şekilde devam etmiştir.



Plastik zon yarıçaplarının hesaplamasının basit ve doğru olması için, model, geleneksel FLAC<sup>3D</sup> modellerinden farklı bazı değişikliklere tabi tutulmuştur, böylece tünel etrafındaki ağlar, dairesel ağlarla değiştirilmiştir. Bu değişiklikler Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Modelin üç boyutlu izometrik görüntüsü



Şekil 3.2. Tünel etrafındaki ağların dairesel ağlarla değişimi

Kaya kütlesinin Mohr-Coulomb geçme ölçütüne göre, doğrusal elastik ve mükemmel plastik modelini takip etmesi var sayılır. Ancak sayısal modelde kullanılan girdi verisinde olduğu gibi, Hoek-Brown'a göre kaya kütle parametreleri kullanılmıştır. Bu amaçla, Hoek-Brown ölçütünün parametreleri göz önünde bulundurularak ve Mohr-Coulomb parametreleri derlenerek, Hoek-Brown'ın yenilme ölçütüne göre program da FISH kodu geliştirilmiştir.

Örtü kalınlığından kaynaklanan başlangıçtaki arazi basıncı tünel derinliği boyunca uygulanmıştır. Bu basıncın tünel derinliği ile doğrusal olarak değiştiği varsayılmaktadır. Bu nedenle, yerinde gerilmenin izotropik olduğu ve  $\gamma H$ 'a eşit olduğu kabul edilir. Öte yandan, yatay ve dikey gerilme bileşenleri arasındaki oranın 1 (hidrostatik durum) olduğu varsayılır.

Tüneli modellemek için gerekli olan parametreler; Young modülünün ( $E$ ), Poisson oranının ( $\nu$ ), tek eksenli basma dayanımının (UCS), içsel sürtünme açısının ( $\phi$ ), genişleme açısının  $\psi$  ve başlangıç geriliminin ( $\sigma_0$ ) de dâhil olduğu zemin ve jeolojik verilerdir. Çizelge 3.1 Hoek-Brown ölçütüne göre tünel ve kaya kütle malzeme özelliklerini göstermektedir. Bu parametreler zayıf kayalar için literatürde sıkça karşımıza çıkan ortalama değerlerden seçilmiş ve yapılan sayısal modeller için sabit kabul edilmiştir.

**Çizelge 3.1:** Tünel ve kaya kütle parametreleri

Parametreler	Birim	Değer
Kaya Kütlesinin Birim Hacim Ağırlığı, $\gamma$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2650
Sağlam Kayanın Elastik Modülü, $E_i$	[GPa]	8
Poisson Oranı, $\nu$	-	0.25
Hoek Örselenme Faktörü, $D_h$	-	0
Tünel Çapı, $D$	[m]	8

Öte yandan GSI, UCS,  $m_i$  ve H sıkışma davranışına etkisini araştırmak için duyarlılık analizlerinde bu parametreler için farklı değerler kullanılmıştır. Bu parametreler için seçilen değerler Bölüm 4'te verilmiştir.

#### 4. SAYISAL MODELLEME SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde, Hoek ve Brown yenilme ölçütüne göre GSI, H, UCS ve  $m_i$  değişkenleri kullanılarak yapılan sayısal modelleme sonuçları verilmiştir. Sayısal modellemeden elde edilen sonuçlar deformasyon konturları ve plastik bölge konturları olarak ayrı ayrı sunulmuştur. Her bir parametre için 7'şer adet, toplam 28 adet model oluşturulmuştur.

Sayısal modellemelerde ve Hoek ve Marinos [10] yarı görgül yaklaşımında kullanılan değişkenler Çizelge 4.1'de verilmiştir. Bu değişkenler yapılan literatür araştırmalarında sıkça karşılaşılan değer aralıkları göz önüne alınarak belirlenmiştir. Bu tabloya göre koyu renk ile belirlenmiş olan sütunlar değişken parametreleri göstermektedir. Elde edilen sonuçlar Hasanpour [6]'un doktora tezi çalışma sonuçları ile karşılaştırılmış ve uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

**Çizelge 4.1:** Analizlerde kullanılan değişkenler

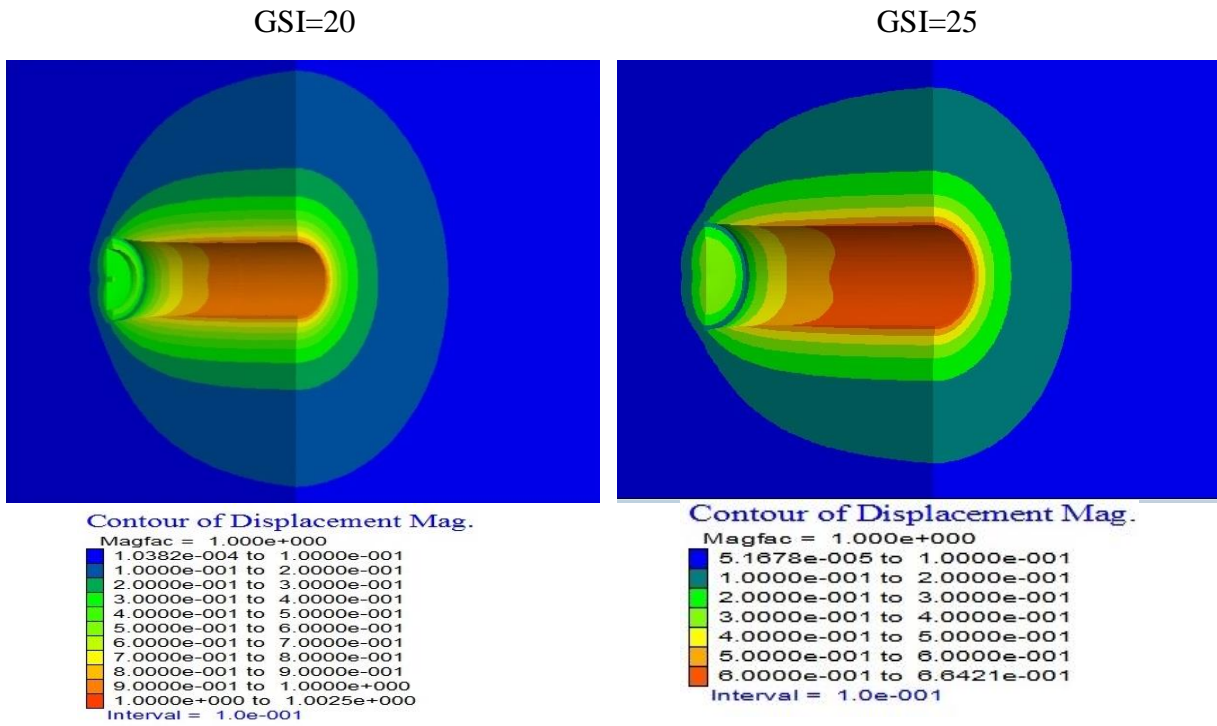
Model No.	H (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$E_i$ (GPa)	$\nu$	GSI	UCS (MPa)	$m_i$
1	50	26	8	0.25	40	35	10
2	100	26	8	0.25	40	35	10
3	250	26	8	0.25	40	35	10
4	500	26	8	0.25	40	35	10
5	750	26	8	0.25	40	35	10
6	1000	26	8	0.25	40	35	10
7	1500	26	8	0.25	40	35	10
8	500	26	8	0.25	20	35	10
9	500	26	8	0.25	25	35	10
10	500	26	8	0.25	30	35	10
11	500	26	8	0.25	35	35	10
12	500	26	8	0.25	40	35	10
13	500	26	8	0.25	45	35	10
14	500	26	8	0.25	50	35	10
15	500	26	8	0.25	40	35	6
16	500	26	8	0.25	40	35	8
17	500	26	8	0.25	40	35	10
18	500	26	8	0.25	40	35	14
19	500	26	8	0.25	40	35	17
20	500	26	8	0.25	40	35	20
21	500	26	8	0.25	40	35	22
22	500	26	8	0.25	40	5	10
23	500	26	8	0.25	40	8	10
24	500	26	8	0.25	40	12	10
25	500	26	8	0.25	40	20	10
26	500	26	8	0.25	40	35	10
27	500	26	8	0.25	40	60	10
28	500	26	8	0.25	40	100	10

## 4.1. Deformasyon Konturları

### 4.1.1. GSI Etkisi

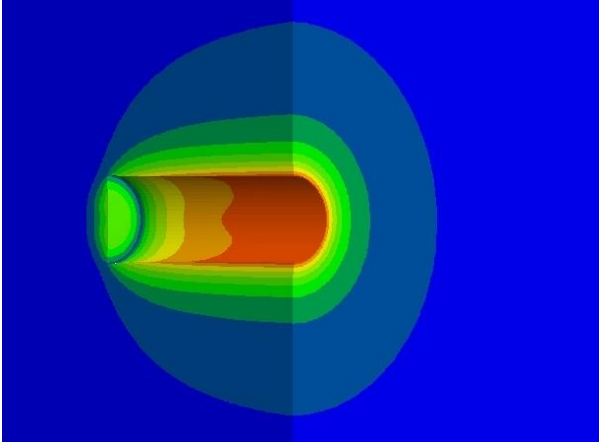
Farklı GSI değerleri kullanılarak yapılan üç boyutlu sayısal modellerden elde edilen deformasyon konturları Şekil 4.1’de verilmiştir.

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi, GSI değeri 20 iken maksimum deformasyon değeri 100 cm olarak bulunmuştur. Öte yandan GSI değeri 50 olduğu zaman maksimum deformasyon 7 cm olarak hesaplanmıştır. 20’den 50’ye artan GSI değişimi ile deformasyon miktarı 93 cm’lik fark göstermektedir. Böylece, GSI değeri arttıkça tünel etrafındaki deformasyonlarda ciddi miktarda azalma gözlemlenmektedir. Bu gözlem, GSI’nin tünel etrafındaki deformasyonlar üzerinde ne kadar etkili bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır. GSI değerini ölçmek için çok dikkatli olmak gerekmektedir. Ölçümlerde en küçük sapma farklı ve yanlış sonuçlara neden olacaktır.

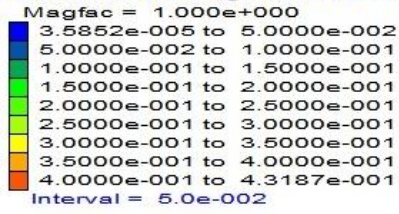


Şekil 4.1. Farklı GSI değerleri için deformasyon konturları

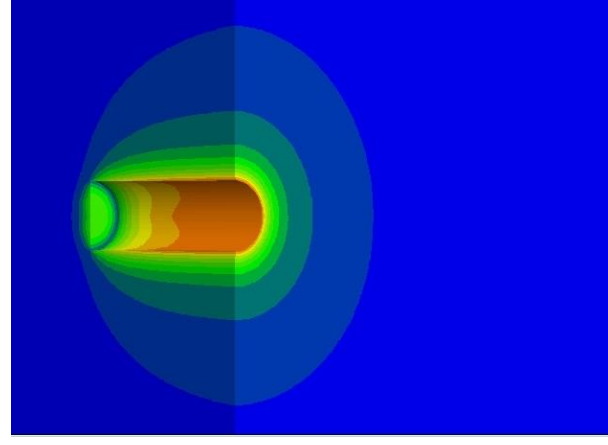
GSI=30



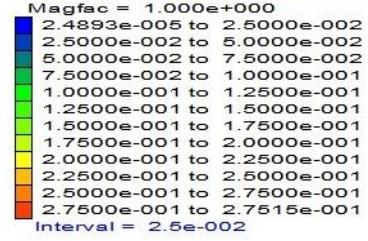
Contour of Displacement Mag.



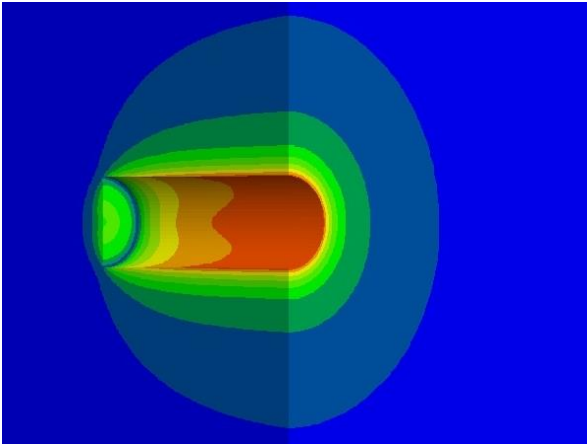
GSI=35



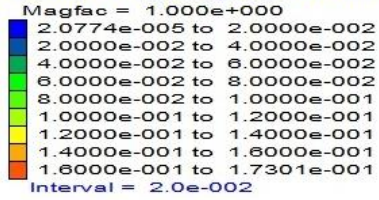
Contour of Displacement Mag.



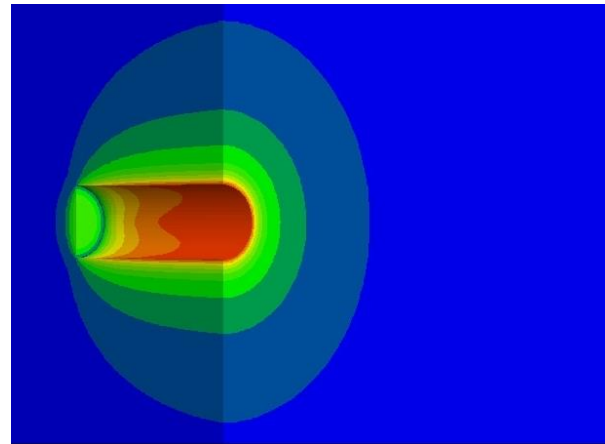
GSI=40



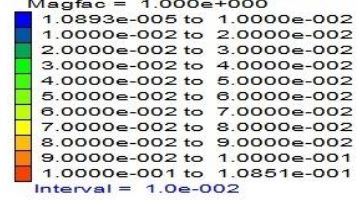
Contour of Displacement Mag.



GSI=45

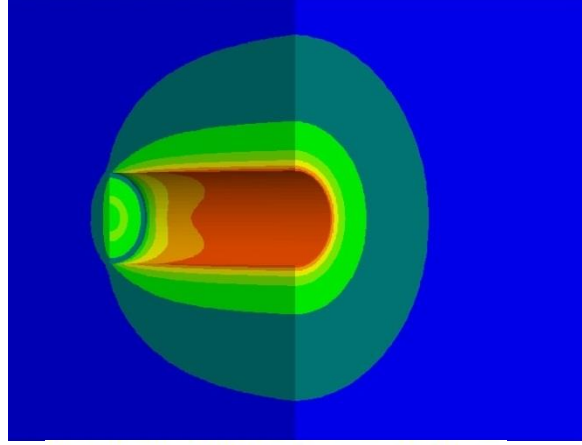


Contour of Displacement Mag.

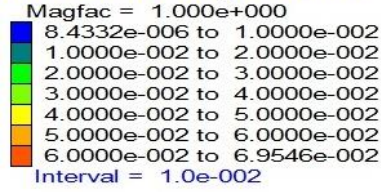


Şekil 4.1. Farklı GSI değerleri için deformasyon konturları (devam ediyor)

GSI=50



Contour of Displacement Mag.



**Şekil 4.1.** Farklı GSI değerleri için deformasyon konturları (devam ediyor)

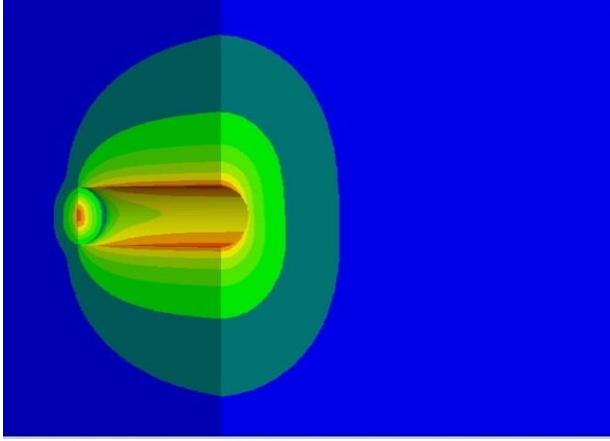
#### 4.1.2. H Etkisi

Üç boyutlu sayısal modellerden, farklı tünel örtü kalınlığı değerleri için bulunan deformasyon konturları Şekil 4.2’de verilmiştir.

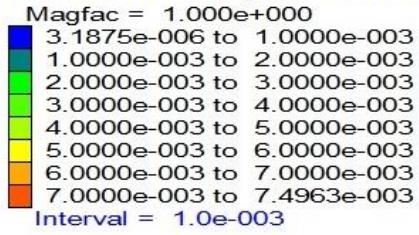
Şekil 4.2’de görüldüğü gibi, örtü kalınlığı 50 m iken maksimum deformasyon değeri 8 cm olarak bulunmuştur. Örtü kalınlığı 50 metreden 1500 metreye çıktığında da maksimum deformasyon 8 cm’den 94.70 cm’ye yükselmiştir. Böylece örtü kalınlığının da deformasyon üzerinde etkili bir parametre olduğu ortaya koyulmuştur. Örtü kalınlığının etkisini değerlendirmenin amacı, bu parametrenin sıkışma olasılığında ne kadar etkili olduğunu göstermektir. Gerçek projelerde örtü kalınlığı tünel boyunca yer yer değiştiğinden dolayı bu parametrenin sıkışma üzerinde etkisinin incelenmesi çok önemlidir.



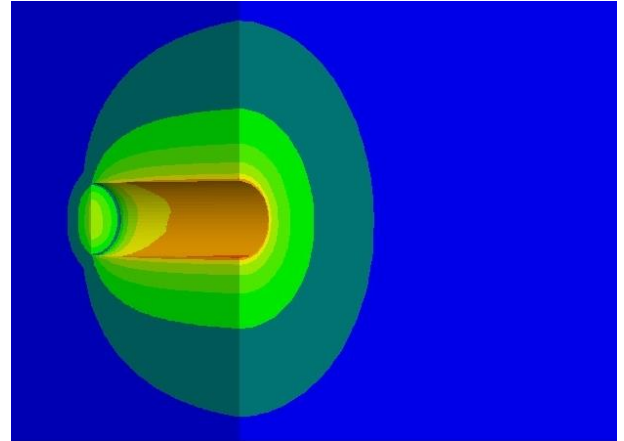
H=50 m



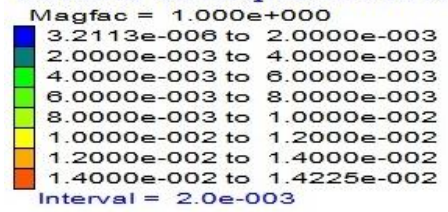
Contour of Displacement Mag.



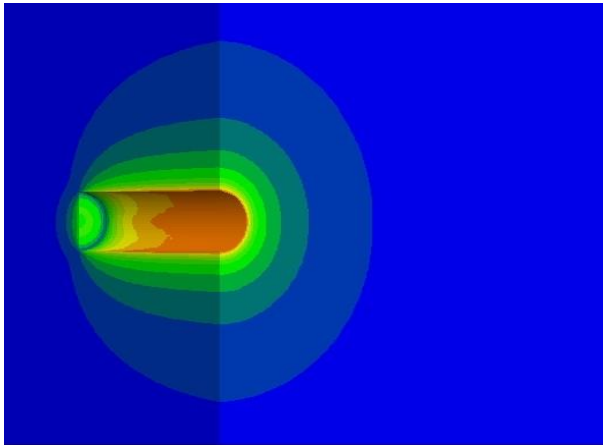
H=100 m



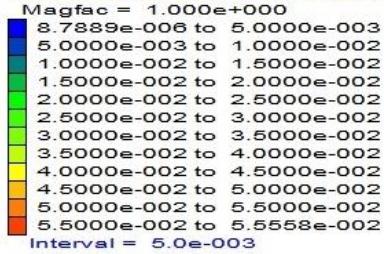
Contour of Displacement Mag.



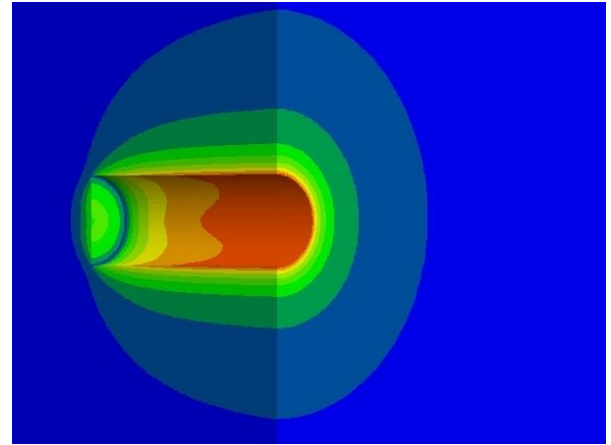
H=250 m



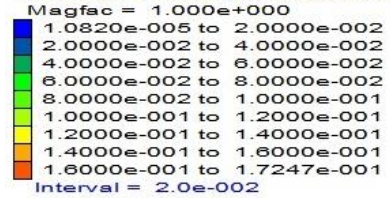
Contour of Displacement Mag.



H=500 m



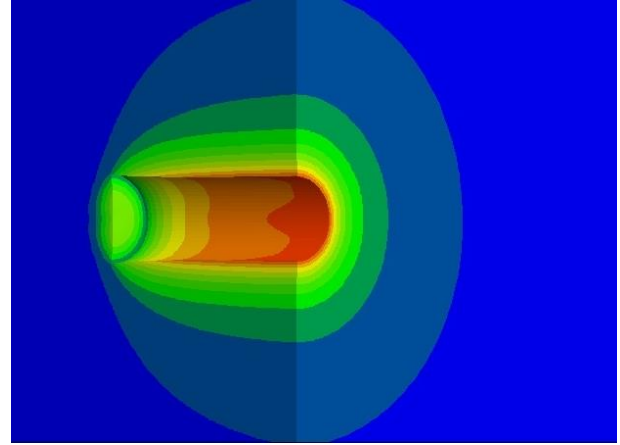
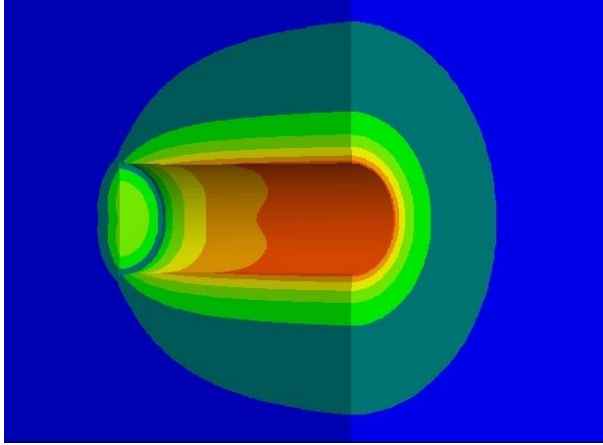
Contour of Displacement Mag.



Şekil 4.2. Farklı örtü kalınlığı değerleri için deformasyon konturları

H=750 m

H=1000 m



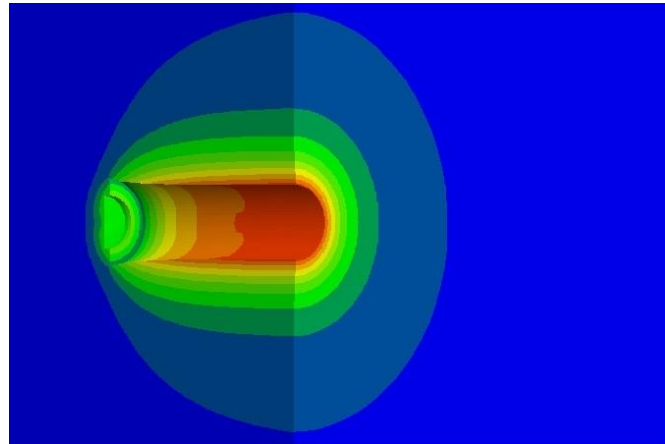
Contour of Displacement Mag.

Magfac = 1.000e+000  
2.8193e-005 to 5.0000e-002  
5.0000e-002 to 1.0000e-001  
1.0000e-001 to 1.5000e-001  
1.5000e-001 to 2.0000e-001  
2.0000e-001 to 2.5000e-001  
2.5000e-001 to 3.0000e-001  
3.0000e-001 to 3.2776e-001  
Interval = 5.0e-002

Contour of Displacement Mag.

Magfac = 1.000e+000  
5.0683e-005 to 5.0000e-002  
5.0000e-002 to 1.0000e-001  
1.0000e-001 to 1.5000e-001  
1.5000e-001 to 2.0000e-001  
2.0000e-001 to 2.5000e-001  
2.5000e-001 to 3.0000e-001  
3.0000e-001 to 3.5000e-001  
3.5000e-001 to 4.0000e-001  
4.0000e-001 to 4.5000e-001  
4.5000e-001 to 5.0000e-001  
5.0000e-001 to 5.1355e-001  
Interval = 5.0e-002

H=1500 m



Contour of Displacement Mag.

Magfac = 1.000e+000  
8.1740e-005 to 1.0000e-001  
1.0000e-001 to 2.0000e-001  
2.0000e-001 to 3.0000e-001  
3.0000e-001 to 4.0000e-001  
4.0000e-001 to 5.0000e-001  
5.0000e-001 to 6.0000e-001  
6.0000e-001 to 7.0000e-001  
7.0000e-001 to 8.0000e-001  
8.0000e-001 to 9.0000e-001  
9.0000e-001 to 9.4728e-001  
Interval = 1.0e-001

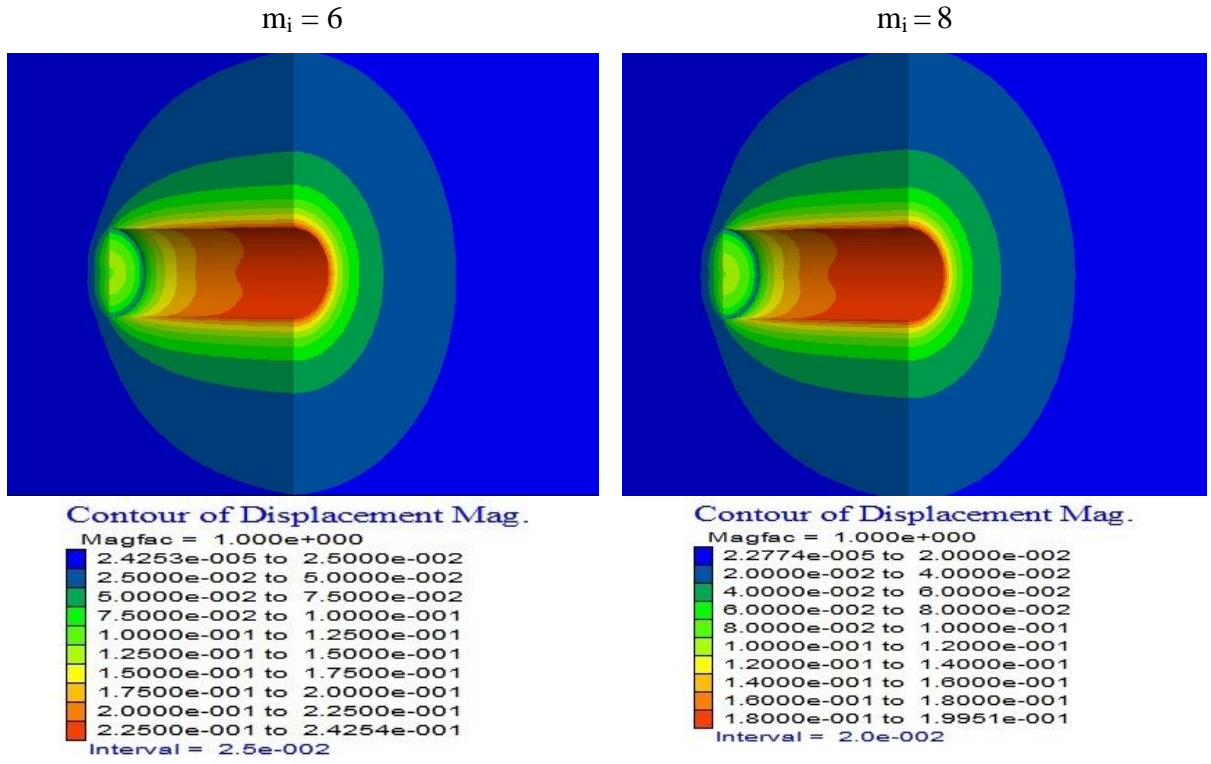
Şekil 4.2. Farklı örtü kalınlığı değerleri için deformasyon konturları (devam ediyor)



### 4.1.3. $m_i$ Etkisi

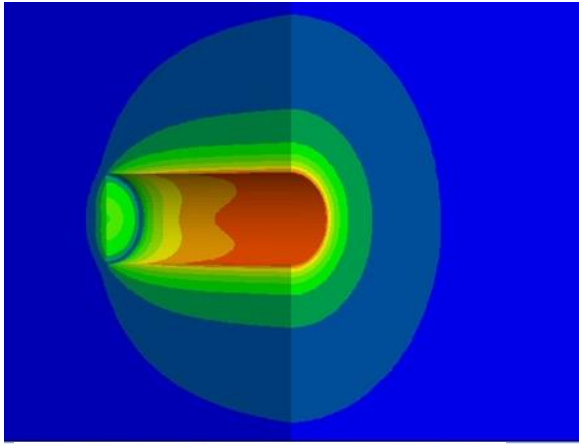
Üç boyutlu sayısal modellerden farklı  $m_i$  değerleri için bulunan deformasyon konturları Şekil 4.3'te verilmiştir.

Şekil 4.3 incelendiğinde  $m_i$  değerinin deformasyon konturları üzerinde (GSI ve H parametreleriyle kıyaslandığında) pek fazla etkisinin olmadığı görülmektedir.  $m_i$  değeri 6'dan 22'ye çıkarıldığında deformasyon değeri ancak 24 cm'den 10 cm'ye düşmüştür. Bu ise  $m_i$  değerinin sıkışma potansiyeline etkisinin göz önünde bulundurulacak kadar önemli bir parametre olmadığını göstermektedir.



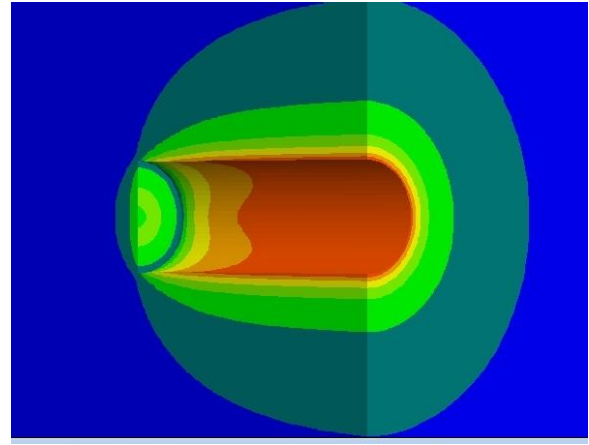
Şekil 4.3. Farklı  $m_i$  değerleri için deformasyon konturları

$m_i = 10$



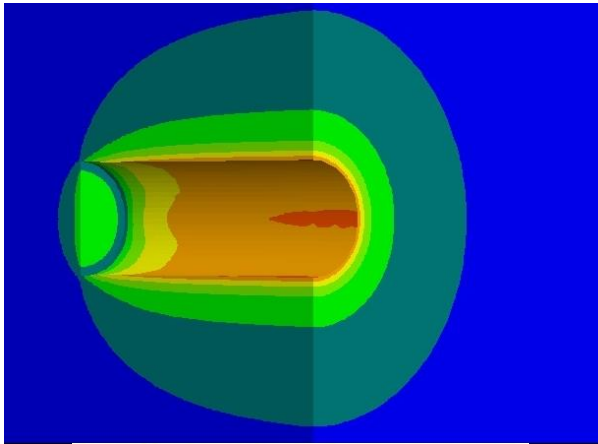
Contour of Displacement Mag.  
Magfac = 1.000e+000  
2.0774e-005 to 2.0000e-002  
2.0000e-002 to 4.0000e-002  
4.0000e-002 to 6.0000e-002  
6.0000e-002 to 8.0000e-002  
8.0000e-002 to 1.0000e-001  
1.0000e-001 to 1.2000e-001  
1.2000e-001 to 1.4000e-001  
1.4000e-001 to 1.6000e-001  
1.6000e-001 to 1.7301e-001  
Interval = 2.0e-002

$m_i = 14$



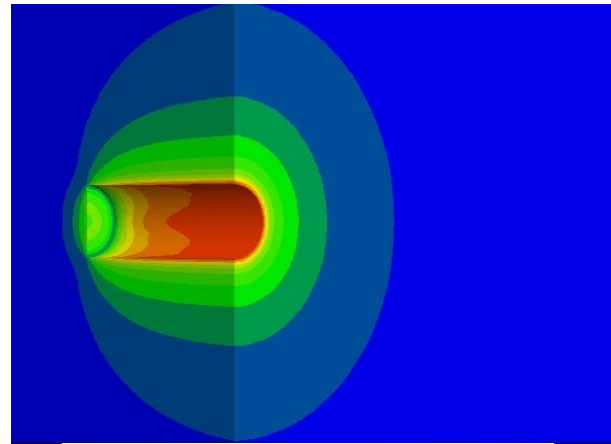
Contour of Displacement Mag.  
Magfac = 1.000e+000  
1.7481e-005 to 2.0000e-002  
2.0000e-002 to 4.0000e-002  
4.0000e-002 to 6.0000e-002  
6.0000e-002 to 8.0000e-002  
8.0000e-002 to 1.0000e-001  
1.0000e-001 to 1.2000e-001  
1.2000e-001 to 1.3949e-001  
Interval = 2.0e-002

$m_i = 17$



Contour of Displacement Mag.  
Magfac = 1.000e+000  
1.4749e-005 to 2.0000e-002  
2.0000e-002 to 4.0000e-002  
4.0000e-002 to 6.0000e-002  
6.0000e-002 to 8.0000e-002  
8.0000e-002 to 1.0000e-001  
1.0000e-001 to 1.2000e-001  
1.2000e-001 to 1.2233e-001  
Interval = 2.0e-002

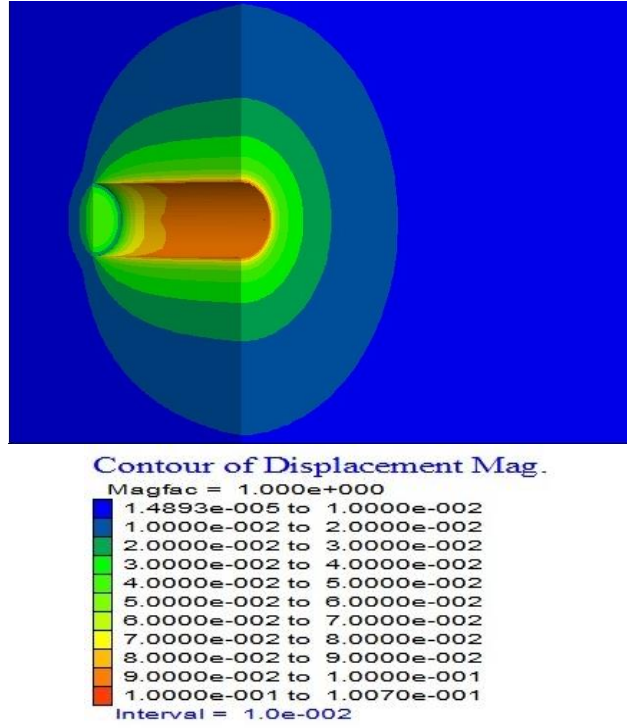
$m_i = 20$



Contour of Displacement Mag.  
Magfac = 1.000e+000  
1.5649e-005 to 1.0000e-002  
1.0000e-002 to 2.0000e-002  
2.0000e-002 to 3.0000e-002  
3.0000e-002 to 4.0000e-002  
4.0000e-002 to 5.0000e-002  
5.0000e-002 to 6.0000e-002  
6.0000e-002 to 7.0000e-002  
7.0000e-002 to 8.0000e-002  
8.0000e-002 to 9.0000e-002  
9.0000e-002 to 1.0000e-001  
1.0000e-001 to 1.0850e-001  
Interval = 1.0e-002

Şekil 4.3. Farklı  $m_i$  değerleri için deformasyon konturları (devam ediyor)

$$m_i = 22$$



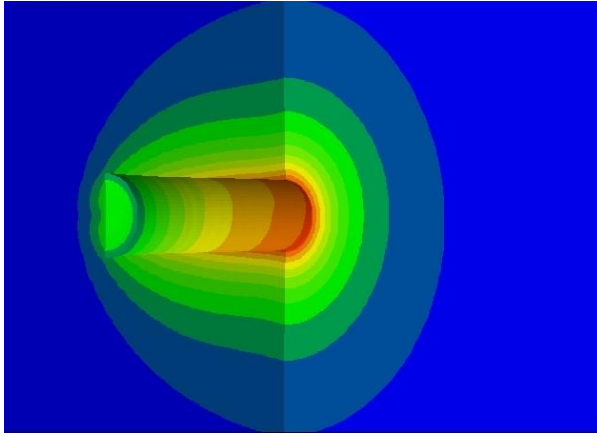
Şekil 4.3. Farklı  $m_i$  değerleri için deformasyon konturları (devam ediyor)

#### 4.1.4. UCS Etkisi

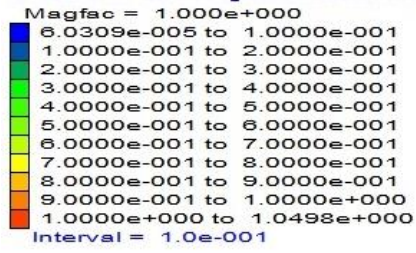
Farklı tek eksenli basma dayanım değerleri kullanılarak yapılan üç boyutlu sayısal modellerden elde edilen deformasyon konturları Şekil 4.4'te verilmiştir.

Kaya kütlelerinin farklı tek eksenli basma dayanımı değerleri değişken olarak sayısal analizlerde kullanılmıştır. Şekil 4.4'te görüldüğü gibi, UCS 5 MPa olduğunda maksimum deformasyon değeri 105 cm olarak bulunmuştur. UCS değeri 100 MPa'a çıkarıldığında maksimum deformasyon 8.5 cm değerine düşmüştür. Bu ise bu parametrenin sıkışma potansiyeli üzerinde etkili bir parametre olduğunu göstermektedir. Tünel boyunca bu parametrenin de sürekli değişiklik göstereceği göz önünde bulundurulduğunda sıkışma potansiyeli analizlerinin daha gerçekçi yapılabilmesi için tünel boyunca daha sık aralıklarla kaya kütlelerinin dayanım değerinin belirlenmesi ve bu belirleme işleminin de oldukça hassas yapılması gerekmektedir.

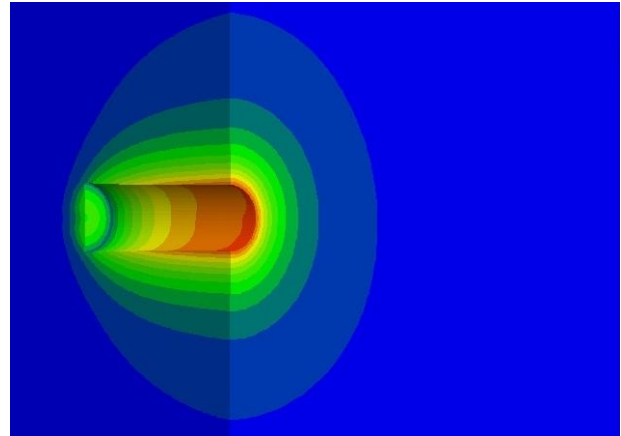
UCS = 5 MPa



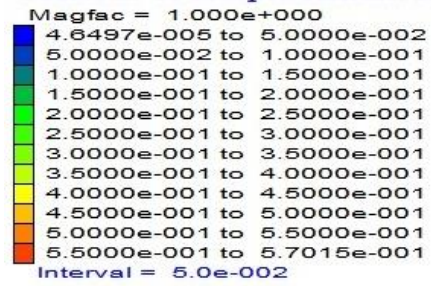
Contour of Displacement Mag.



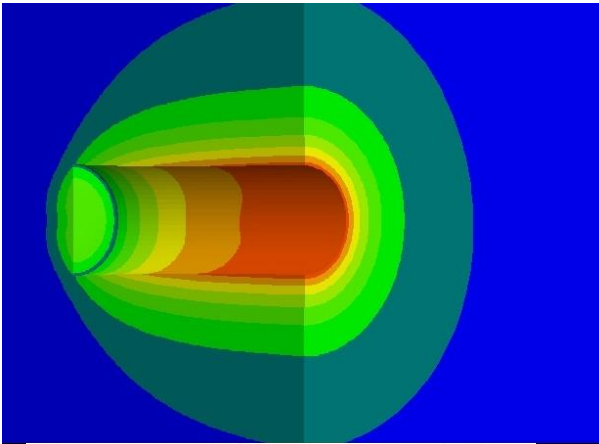
UCS= 8 MPa



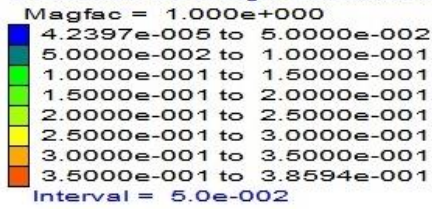
Contour of Displacement Mag.



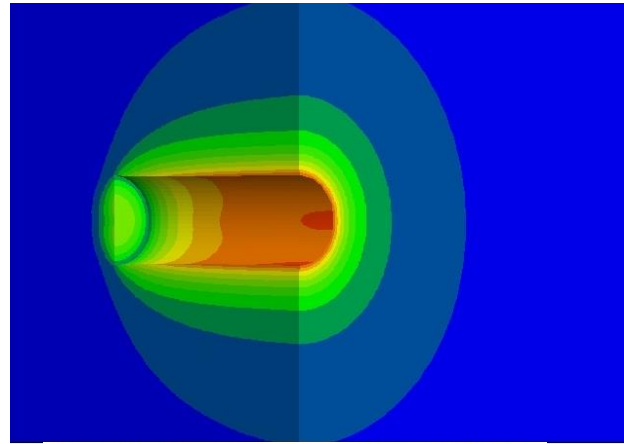
UCS = 12 MPa



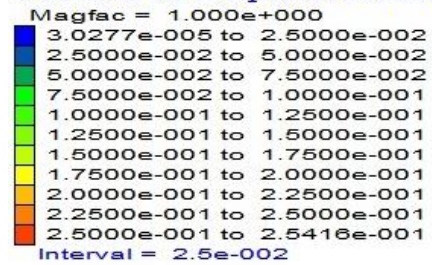
Contour of Displacement Mag.



UCS = 20 MPa



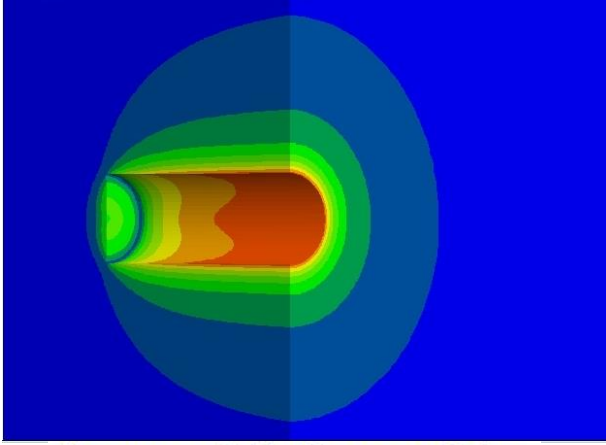
Contour of Displacement Mag.



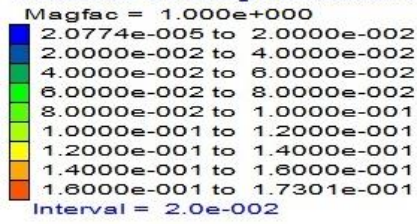
Şekil 4.4. Farklı UCS değerleri için deformasyon konturları



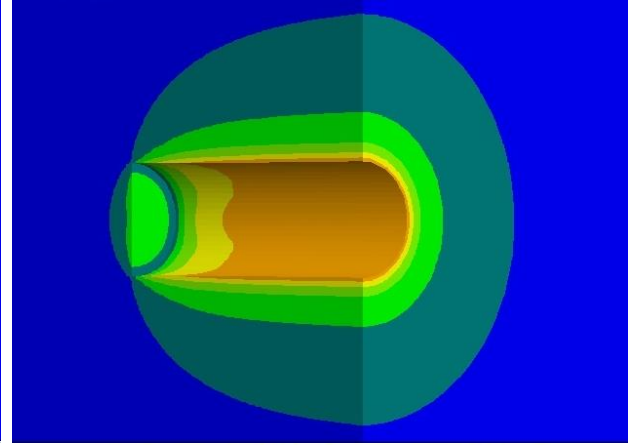
UCS = 35 MPa



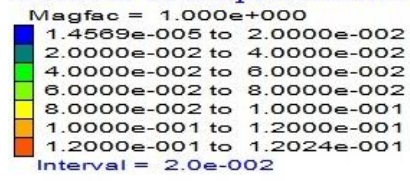
Contour of Displacement Mag.



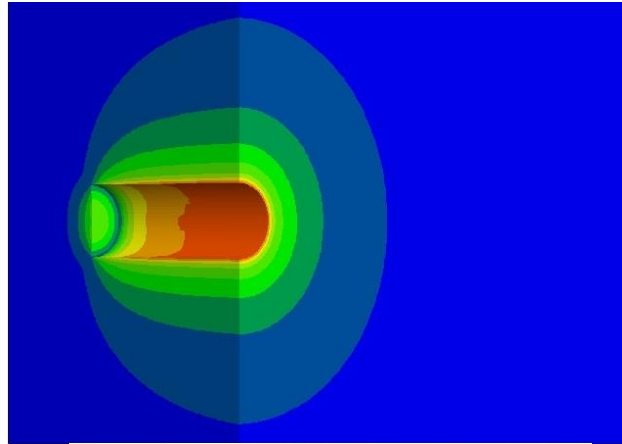
UCS = 60 MPa



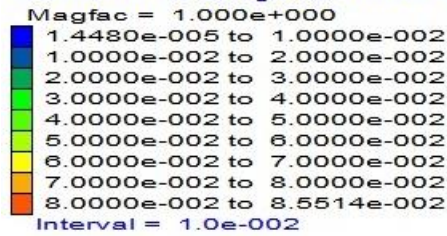
Contour of Displacement Mag.



UCS = 100MPa



Contour of Displacement Mag.



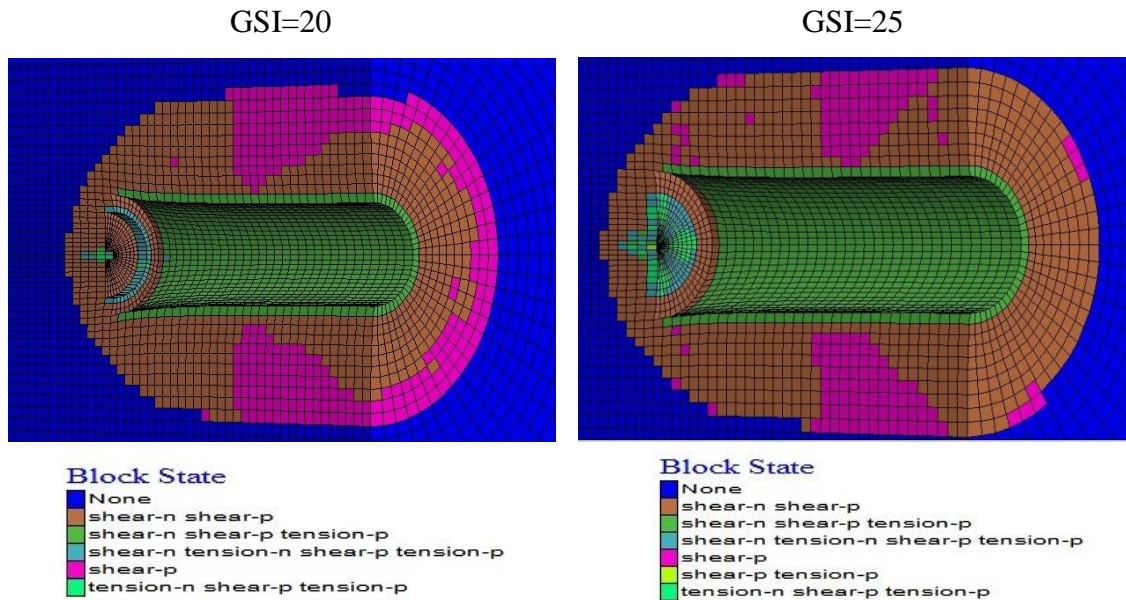
Şekil 4.4. Farklı UCS değerleri için deformasyon konturları (devam ediyor)

## 4.2. Plastik Bölge Konturları

### 4.2.1. GSI Etkisi

Farklı GSI değerleri kullanılarak yapılan üç boyutlu sayısal modellerden bulunan plastik bölge konturları Şekil 4.5'te verilmiştir.

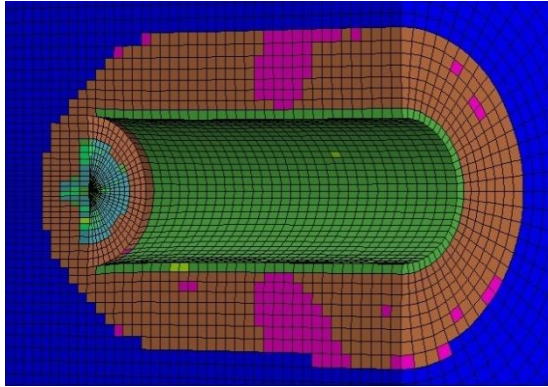
Şekil 4.5'te görüldüğü gibi, GSI değeri 20 iken plastik bölge kalınlık değeri 15 m olarak bulunmuştur. Öte yandan GSI değeri 50'ye yükseldiğinde ise plastik bölge kalınlık değeri 6 m olarak ölçülmüştür. 20'den 50'ye artan GSI değişimi ile plastik bölge 9 m'lik fark göstermektedir. Böylece, GSI değeri arttıkça tünel etrafındaki plastik bölgede, deformasyonda da olduğu gibi ciddi miktarda azalma gözlemlenmektedir. Bu ise, bir kez daha GSI'nin tünel etrafındaki plastik bölge kalınlığı ve deformasyonlar üzerinde ne kadar etkili bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.5. Farklı GSI değerleri için plastik bölge konturları

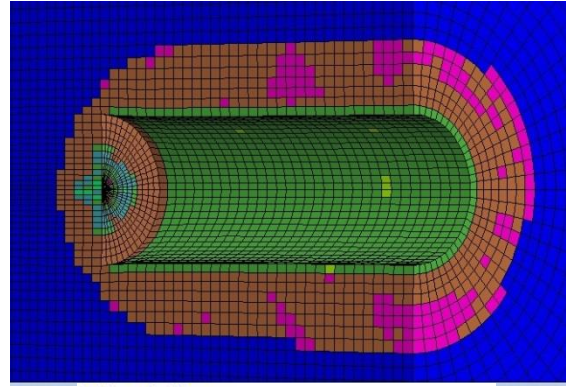


GSI=30



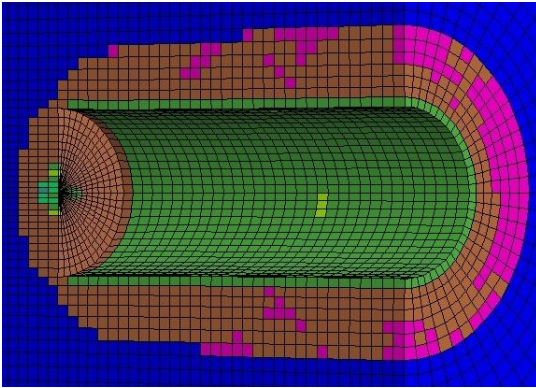
**Block State**  
None  
shear-n shear-p  
shear-n shear-p tension-p  
shear-n tension-n shear-p tension-p  
shear-p  
shear-p tension-p  
tension-n shear-p tension-p

GSI=35



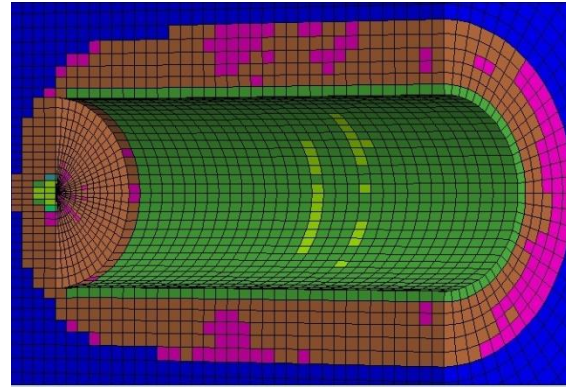
**Block State**  
None  
shear-n shear-p  
shear-n shear-p tension-p  
shear-n tension-n shear-p tension-p  
shear-n tension-n shear-p tension-p  
shear-p  
shear-p tension-p  
tension-n shear-p tension-p

GSI=40



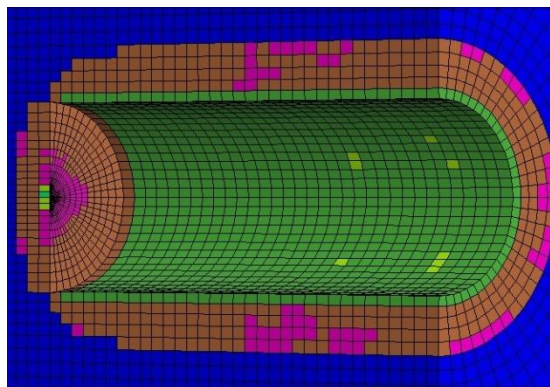
**Block State**  
None  
shear-n shear-p  
shear-n shear-p tension-p  
shear-n tension-n shear-p tension-p  
shear-p  
shear-p tension-p  
tension-n shear-p tension-p

GSI=45



**Block State**  
None  
shear-n shear-p  
shear-n shear-p tension-p  
shear-n tension-n shear-p tension-p  
shear-p  
shear-p tension-p  
tension-n shear-p tension-p

GSI=50



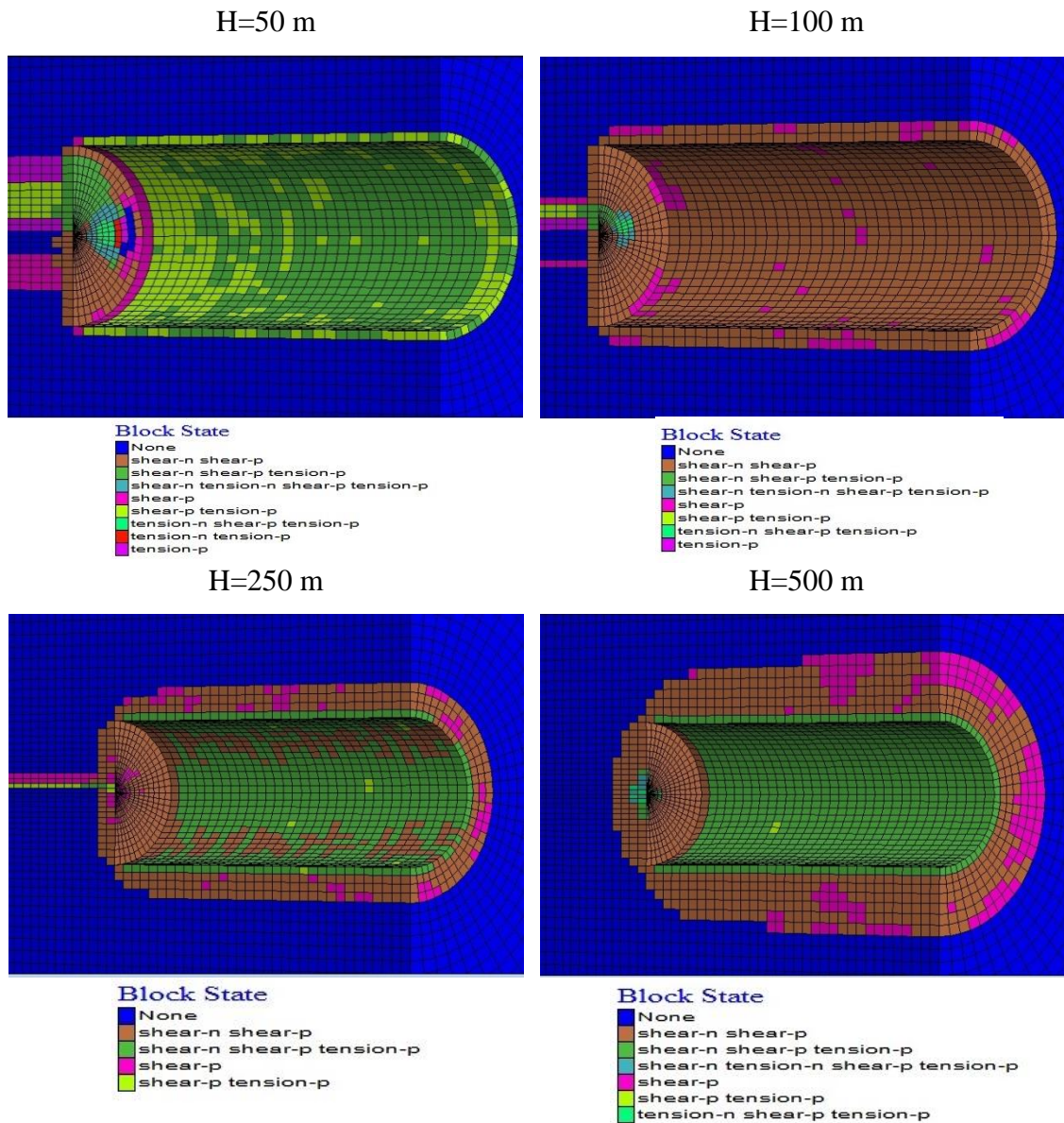
**Block State**  
None  
shear-n shear-p  
shear-n shear-p tension-p  
shear-p  
shear-p tension-p  
tension-n shear-p tension-p

Şekil 4.5. Farklı GSI değerleri için plastik bölge konturları (devam ediyor)

#### 4.2.2. H Etkisi

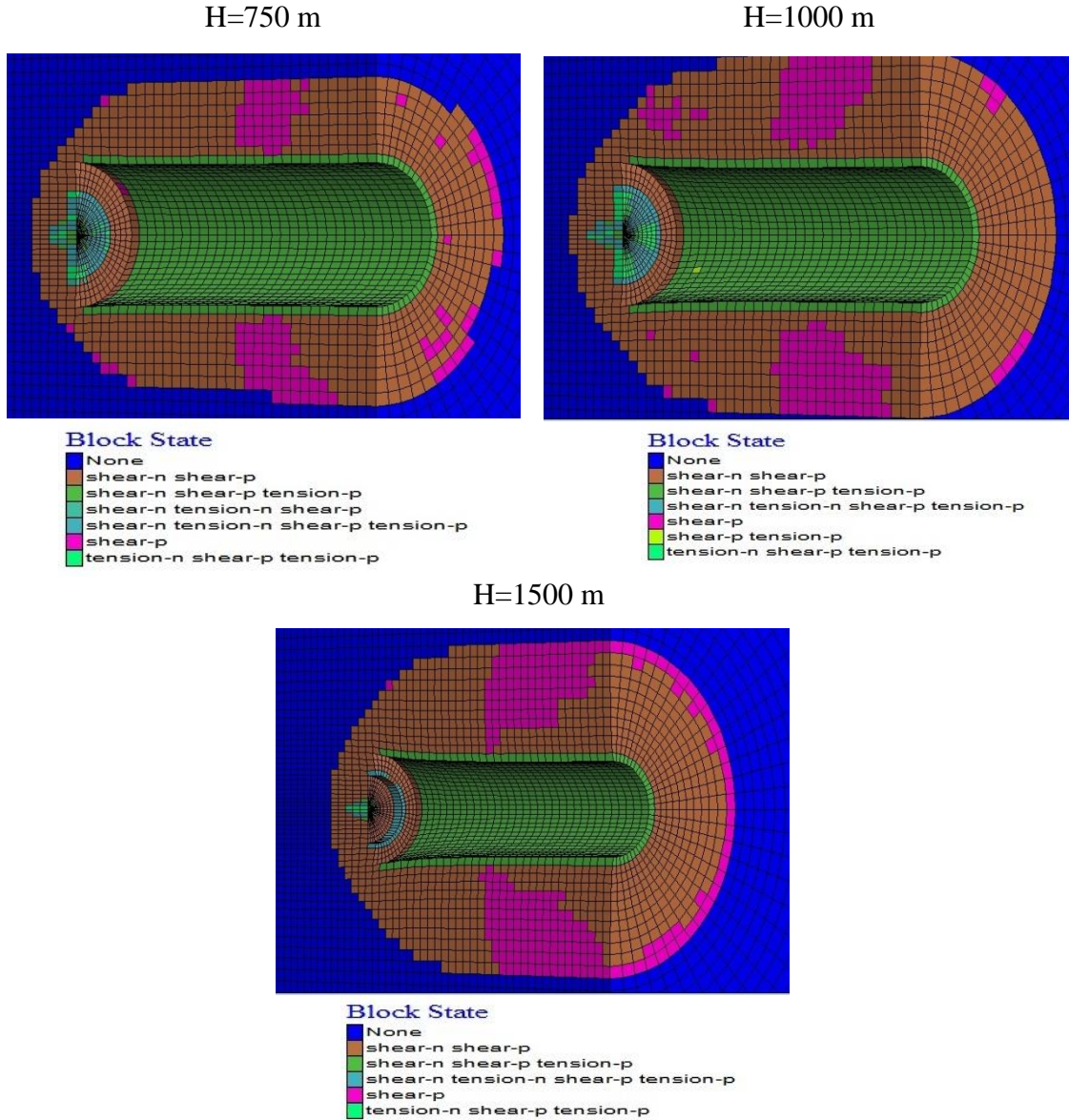
Farklı tünel örtü kalınlığı değerleri kullanılarak yapılan üç boyutlu sayısal modellerden elde edilen plastik bölge konturları Şekil 4.6’da verilmiştir.

Şekil 4.6’da görüldüğü gibi, örtü kalınlığı 50 m iken plastik bölge kalınlık değeri 4 m’dir. Örtü kalınlığı arttıkça plastik bölge kalınlık değeri 4 m’den 16 m’ye çıkmıştır. Bu sonuç, deformasyon analizleri ile benzer sonucu vermekle birlikte, örtü kalınlığının plastik bölge kalınlığı üzerinde de etkili bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.6. Farklı örtü kalınlığı değerleri için plastik bölge konturları



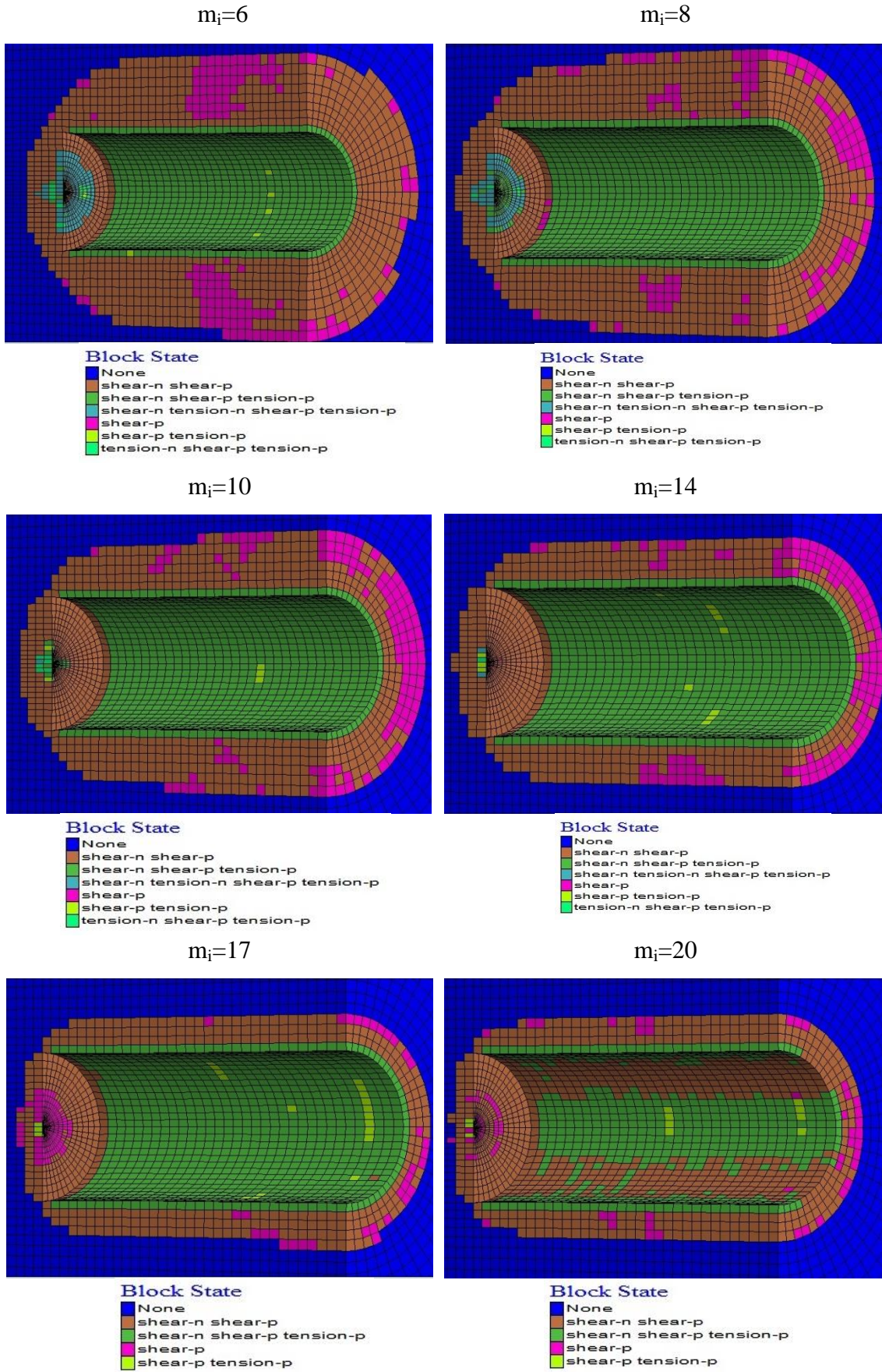


Şekil 4.6. Farklı örtü kalınlığı değerleri için plastik bölge konturları (devam ediyor)

#### 4.2.3. $m_i$ Etkisi

Üç boyutlu sayısal modellerden farklı  $m_i$  değerleri için bulunan plastik bölge konturları Şekil 4.7’de verilmiştir.

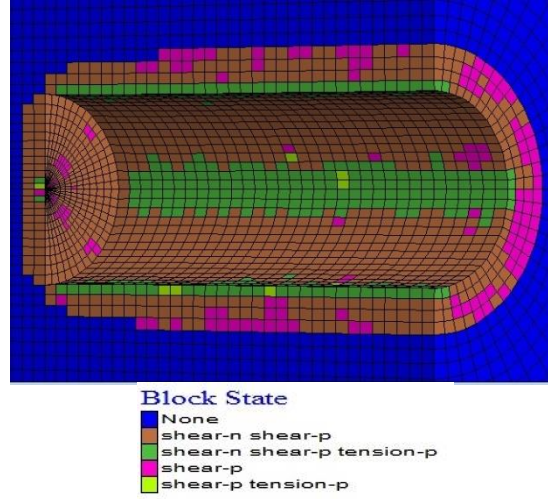
Şekil 4.7’de görüldüğü gibi,  $m_i$  değeri 6’dan 22’ye artarken, plastik bölge kalınlık değerleri 10 m’den 6 m’ye düşmektedir. Plastik bölgenin büyüklüğünde  $m_i$  değerinin artışıyla bir değişim gözlenmekle birlikte, belirlenen bu değişim diğer değişken parametrelerin değişimiyle (GSI ve örtü yükü kalınlığı) kıyaslandığında çok büyük bir fark olmadığını göstermektedir.



Şekil 4.7. Farklı  $m_i$  değerleri için plastik bölge konturları



$$m_i=22$$



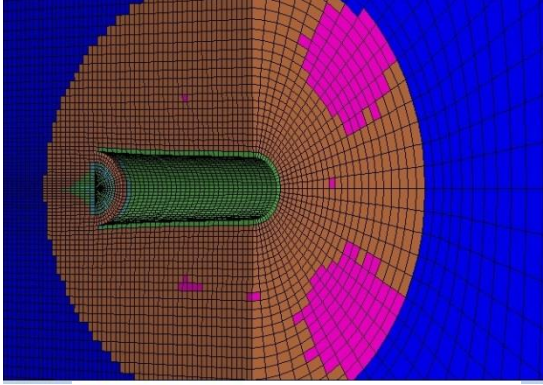
Şekil 4.7. Farklı  $m_i$  değerleri için plastik bölge konturları (devam ediyor)

#### 4.2.4. UCS Etkisi

Üç boyutlu sayısal modellerden farklı UCS değerleri için bulunan plastik bölge konturları Şekil 4.8’de verilmiştir.

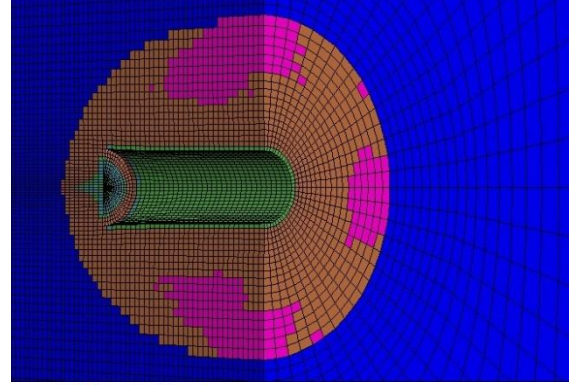
Şekil 4.8’de görüldüğü gibi, UCS 5 MPa olduğunda plastik bölge değeri 23 m olarak bulunmuştur. UCS değeri 100 MPa değerine yükseltildiğinde ise plastik bölge 5 m olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar ise UCS değerinin plastik bölge kalınlığını etkileyen önemli bir parametre olduğunu ve sıkışma potansiyelinin analizinde göz önünde bulundurulması gereken bir parametre olduğunu göstermektedir.

UCS=5 MPa



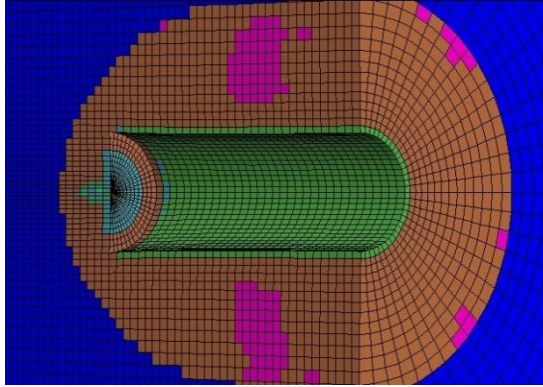
**Block State**  
None  
shear-n shear-p  
shear-n shear-p tension-p  
shear-n tension-n shear-p tension-p  
shear-p  
tension-n shear-p tension-p

UCS=8 MPa



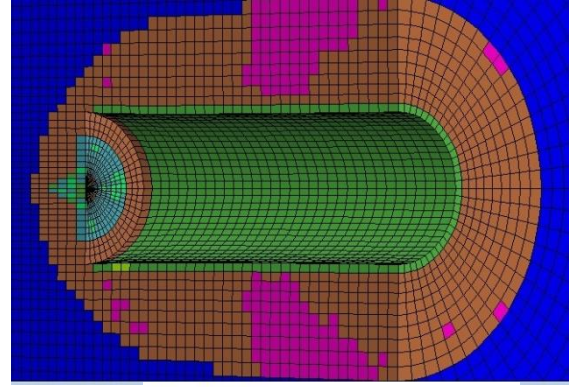
**Block State**  
None  
shear-n shear-p  
shear-n shear-p tension-p  
shear-n tension-n shear-p tension-p  
shear-p  
tension-n shear-p tension-p

UCS=12 MPa



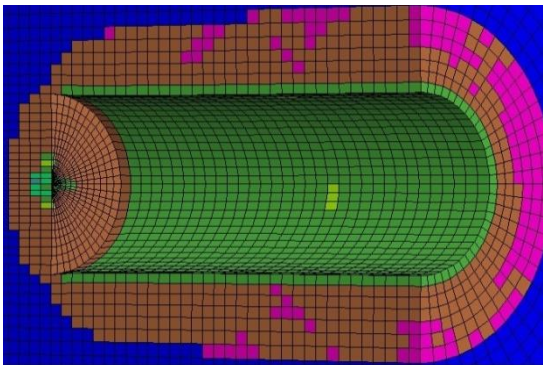
**Block State**  
None  
shear-n shear-p  
shear-n shear-p tension-p  
shear-n tension-n shear-p  
shear-n tension-n shear-p tension-p  
shear-p  
tension-n shear-p tension-p

UCS=20 MPa



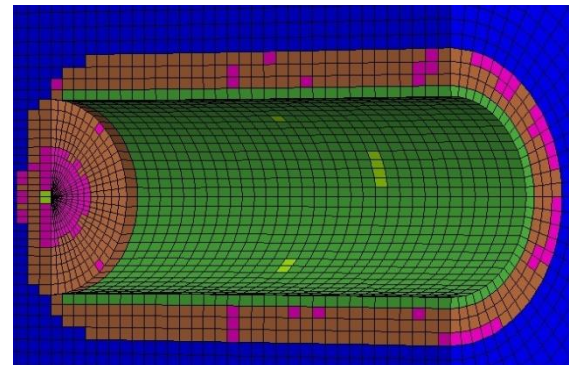
**Block State**  
None  
shear-n shear-p  
shear-n shear-p tension-p  
shear-n tension-n shear-p  
shear-n tension-n shear-p tension-p  
shear-p  
shear-p tension-p  
tension-n shear-p tension-p

UCS=35 MPa



**Block State**  
None  
shear-n shear-p  
shear-n shear-p tension-p  
shear-n tension-n shear-p tension-p  
shear-p  
shear-p tension-p  
tension-n shear-p tension-p

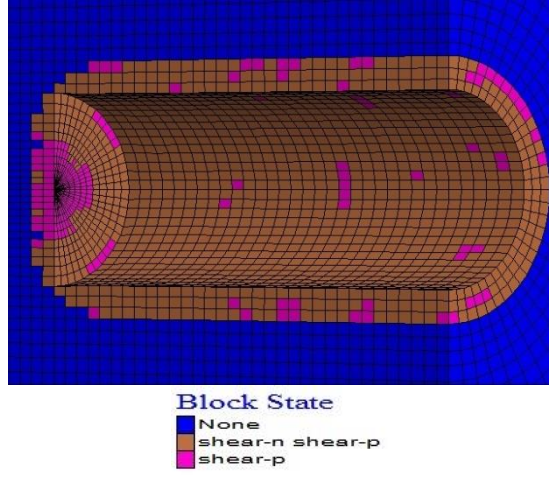
UCS=60 MPa



**Block State**  
None  
shear-n shear-p  
shear-n shear-p tension-p  
shear-p  
shear-p tension-p

Şekil 4.8. Farklı UCS değerleri için plastik bölge konturları

UCS=100 MPa



Şekil 4.8. Farklı UCS değerleri için plastik bölge konturları (devam ediyor)

## 5. DUYARLILIK ANALİZLERİ

Duyarlılık, değişkenlerde veya varsayımlarda ortaya çıkacak değişmelerin modelin sonuçları üzerindeki etkisini ölçmeye yönelik çözümlene tekniğidir.

Bu bölümde, sayısal modellemelerde kullanılan kaya kütlesi değişkenleri; GSI, UCS, H ve  $m_i$ , tünel etrafında oluşan birim deformasyon değerlerine göre grafiksel olarak sunulmuş ve sıkışma derecesi bu grafiklere bağlı olarak verilmiştir. Daha sonra sayısal modelden alınan sonuçlar ile yarı görgül yaklaşımdan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sayısal modellemede, tünelin kuru ortamda kazıldığı varsayılmıştır. Bu yüzden su basıncının oluşturacağı baskı dikkate alınmamıştır.

Örnek olarak GSI = 20 için hesaplamalar aşağıdaki gibidir,

Kaya kütlesi özellikleri:

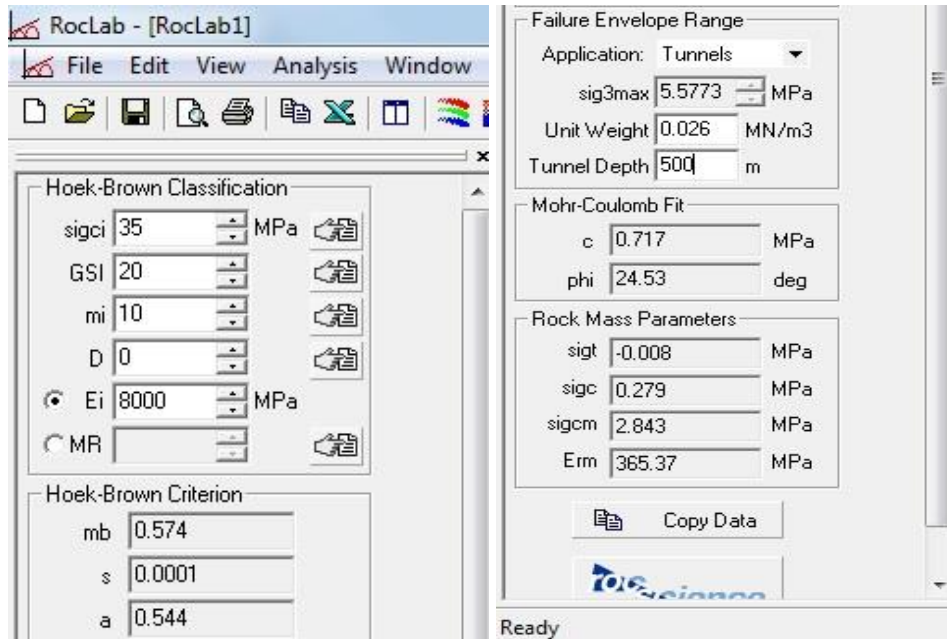
H= 500 m      GSI= 20

$\gamma$ = 26 kN/m<sup>3</sup>      UCS= 35 MPa

$E_i$ = 8 GPa       $m_i$ = 10

$\nu$  = 0.25

Yukarıdaki değerler kullanılarak  $\sigma_{cm}$  değeri Roclab programında Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de verildiği gibi hesaplanmıştır.  $\sigma_{cm}$  değerini 2. Bölüm’de verilen eşitlikleri kullanarak hesaplamak da mümkündür.



Şekil 5.1. RocLab programı kullanılarak  $\sigma_{cm}$  değerinin hesaplanması



### Hoek-Brown Sınıflandırması

$$\text{UCS} = 35 \text{ MPa} \quad m_i = 10 \quad E_i = 8000 \text{ MPa}$$

$$\text{GSI} = 20 \quad D = 0$$

### Hoek-Brown Ölçütü

$$m_b = 0.574 \quad s = 0.0001 \quad \alpha = 0.544$$

### Mohr-Coulomb

$$\text{Cohesion} = 0.717 \text{ MPa} \quad \text{sürtünme açısı} = 24.53^\circ$$

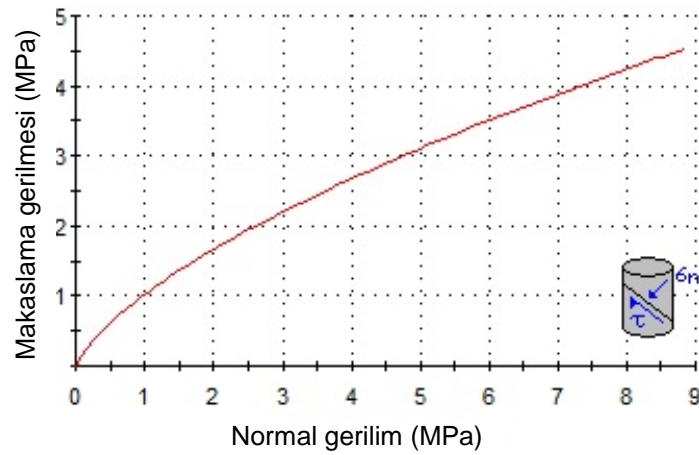
### Kaya Kütle Parametreleri

$$\text{Çekme dayanımı} = -0.008 \text{ MPa}$$

$$\text{Tek eksenli basma dayanımı} = 0.279 \text{ MPa}$$

$$\text{Global dayanım} = 2.843 \text{ MPa}$$

$$\text{Deformasyon modülü} = 365.37 \text{ MPa}$$



Şekil 5.2. GSI= 20 için makaslama gerilimi ile normal gerilim grafiği

$$\varepsilon_t = 0.2 \left( \frac{\sigma_{cm}}{p_0} \right)^{-2} = 0.2 \left( \frac{2.843 \times 1000}{500 \times 26} \right)^{-2} = 4.182$$

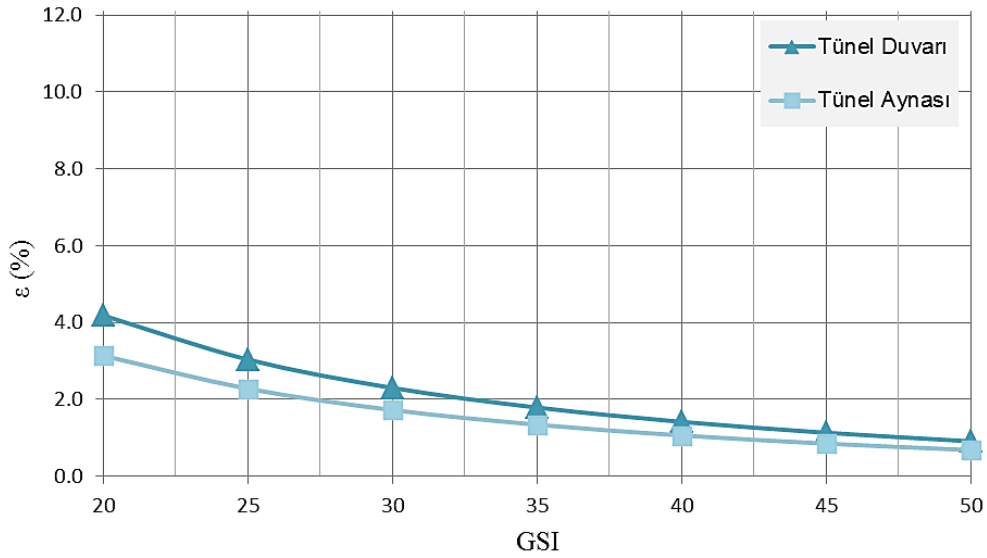
$$\varepsilon_f = 0.15 \left( \frac{\sigma_{cm}}{p_0} \right)^{-2} = 0.15 \left( \frac{2.843 \times 1000}{500 \times 26} \right)^{-2} = 3.136$$

### 5.1. GSI Parametrik Analizleri

Sayısal analizlerden elde edilen tünel duvarlarındaki ve aynasındaki birim deformasyonun ( $\epsilon$ ), farklı GSI değerleri için değişimi Şekil 5.3'te verilmiştir. Şekil 5.3'te görüldüğü gibi GSI değerleri 20'den 50'ye artarken, tünel duvarındaki  $\epsilon$  değerleri 4.2 m'den 0.9 m'ye, tünel aynasındaki  $\epsilon$  değerleri ise 3.1 m'den 0.7 m'ye düşmüştür. Bu ise GSI değerlerinin değişiminin  $\epsilon$  değerlerinin değişimini büyük ölçüde etkilediğini göstermektedir.

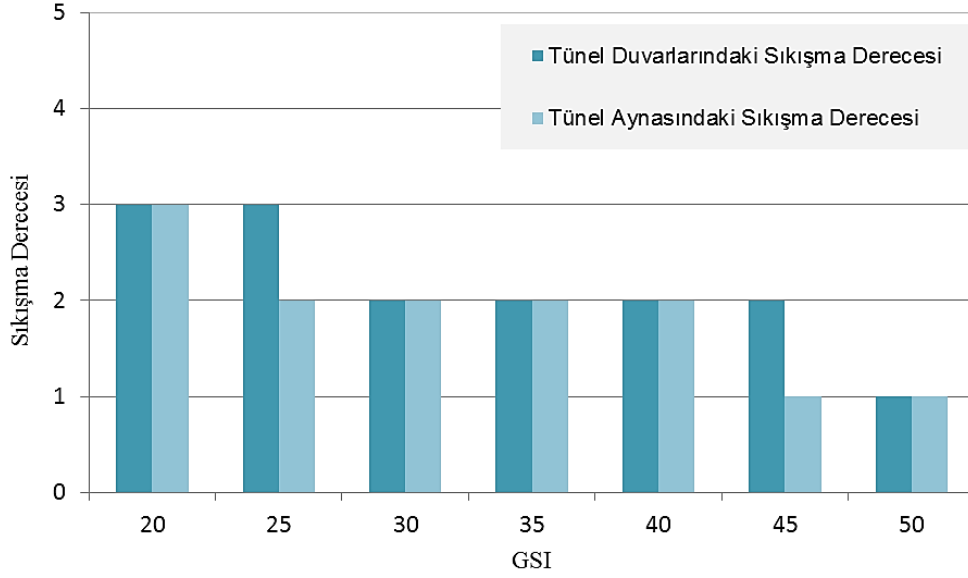
Şekil 5.4'te ise, farklı GSI değerlerine göre tünel duvarlarındaki ve tünel aynasındaki sıkışma dereceleri sunulmuştur. Şekilden de görüldüğü gibi tünel duvarı ve tünel aynası için ayrı ayrı hesaplanan sıkışma dereceleri artan GSI değerleri ile yaklaşık birbirlerine paralel şekilde azalmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, GSI parametresinin daha dikkatli ölçülmesi bir kez daha önerilmektedir. Bu konu ile ilgili Sönmez ve Ulusay [30, 24] ve Sönmez [30]'in GSI'nın belirlenmesi ile ilgili kapsamlı çalışmaları bulunmaktadır. Bu çalışmalarda Hoek-Brown yenilme ölçütündeki GSI belirlenmesi ile ilgili bazı eksiklikleri gidermişlerdir. Bu nedenle GSI hesaplamalarında bu durumların göz önüne alınması gerekmektedir.



Şekil 5.3. Tünel duvarı ve aynasındaki birim deformasyonun farklı GSI değerleri ile ilişkisi



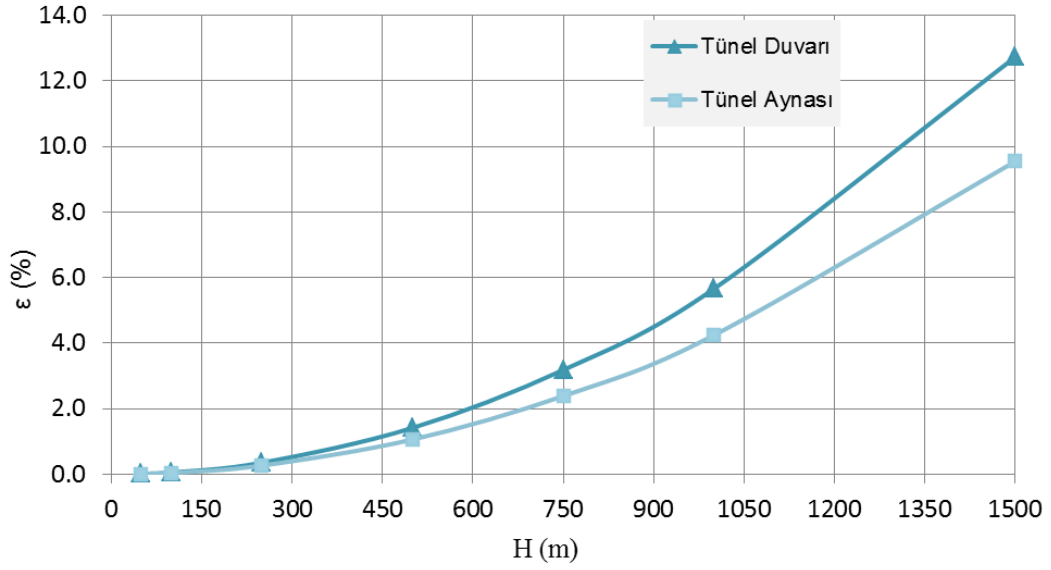


**Şekil 5.4.** Tünel duvarları ve aynasındaki sıkışma derecesinin farklı GSI değerleri ile değişimi

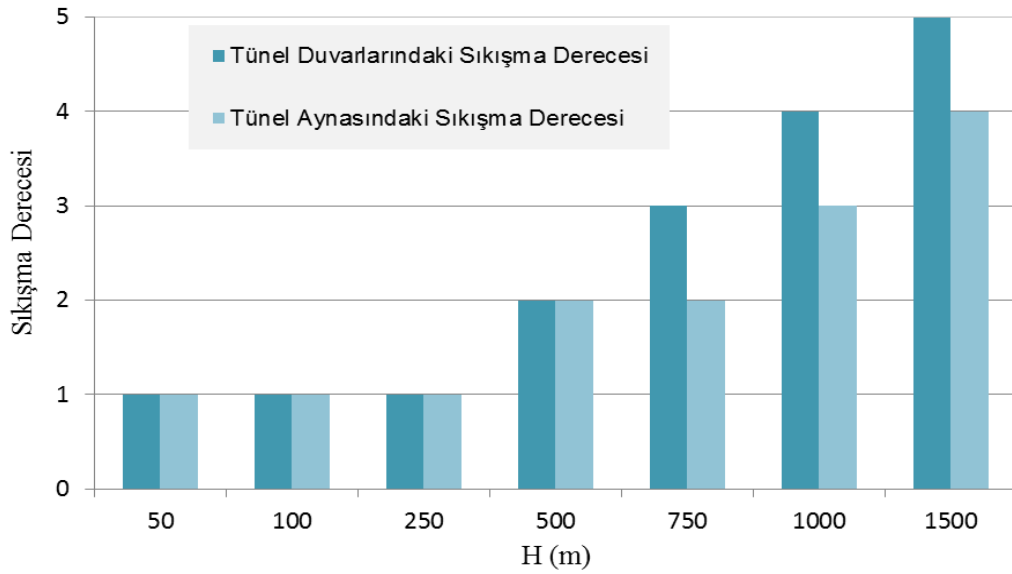
## 5.2. H Parametrik Analizleri

Sayısal analizlerden hesaplanan tünel duvarlarındaki ve tünel aynasındaki birim deformasyon değerlerinin farklı örtü kalınlıkları için değişimi Şekil 5.5'te verilmiştir. Şekil 5.5'te görüldüğü gibi, örtü kalınlığı değerleri 50 m'den 1500 m'e artarken, tünel duvarındaki  $\varepsilon$  değeri 0.014 m'den 12.73 m'ye, tünel aynasındaki  $\varepsilon$  değerleri ise 0.011 m'den 9.545 m'e artmıştır. Bu ise örtü kalınlığı değerlerinin değişiminin  $\varepsilon$  değerlerinin değişimini çok büyük ölçüde etkilediğini göstermektedir.

Şekil 5.6'da ise, tünel duvarlarındaki ve tünel aynasındaki sıkışma dereceleri farklı örtü kalınlığı değerlerine bağlı olarak verilmiştir. Şekil 5.6'da görüldüğü gibi tünel duvarlarındaki ve tünel aynası için ayrı ayrı hesaplanan sıkışma dereceleri artan örtü kalınlığı değerleri ile yaklaşık birbirlerine paralel şekilde artmaktadır. Sıkışma dereceleri tünel duvarları ve aynası için örtü kalınlığının ilk 500 m'sine kadar aynı şekilde davranırken, grafiğin tamamı incelendiğinde tünel duvarındaki sıkışma derecesinin 1'den 5'e kadar, tünel aynasındaki sıkışma derecesinin ise 1'den 4'e kadar arttığı belirlenmiştir.



Şekil 5.5. Tünel duvarı ve aynasındaki birim deformasyonun farklı H değerleri ile ilişkisi



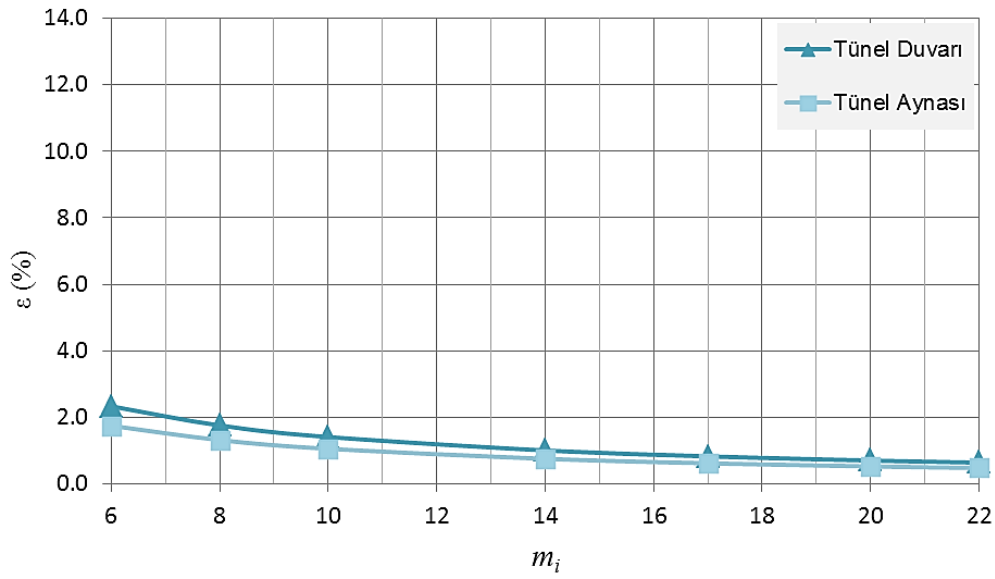
Şekil 5.6. Tünel duvarları ve aynasındaki sıkışma derecesinin farklı H değerleri ile değişimi

### 5.3. $m_i$ Parametrik Analizleri

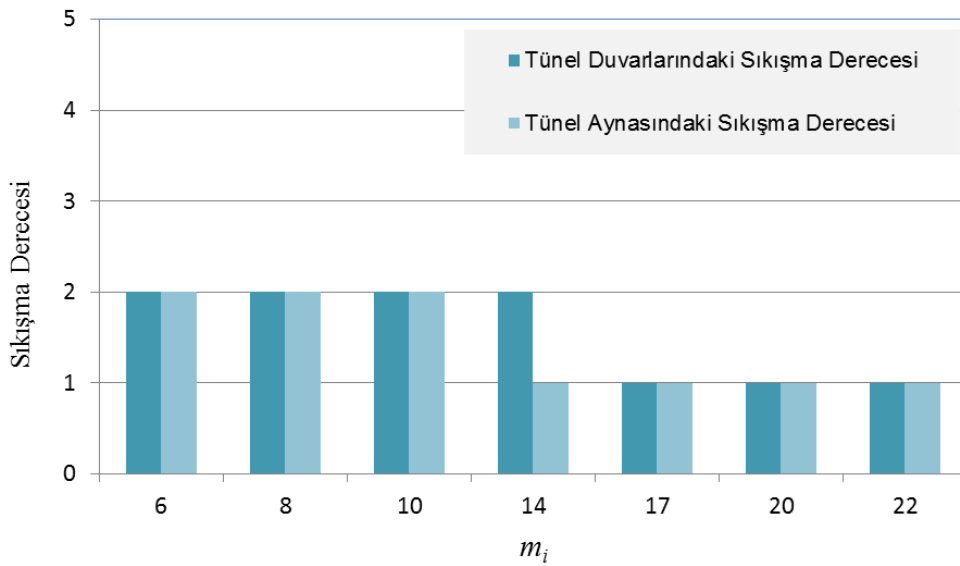
Tünel duvarı ve aynasındaki birim deformasyonun farklı  $m_i$  değerleri için değişimi Şekil 5.7'de verilmiştir. Şekil 5.7'de görüldüğü gibi,  $m_i$  değerleri 6'dan 22'ye çıkarken, tünel duvarındaki  $\varepsilon$  değerleri 2.34 m'den 0.64 m'ye, tünel aynasındaki  $\varepsilon$  değerleri ise 1.75 m'den

0.48 m'ye düşmüştür.  $m_i$  değerlerinin değişimi  $\varepsilon$  değerlerinin değişimini etkilemiştir ancak değerler arasındaki fark çok büyük değildir.

Şekil 5.8'de ise sayısal analizlerden elde edilen birim deformasyon sonuçları ve Hoek ve Marinos [10] yaklaşımına göre hesaplanan tünel duvarındaki ve tünel aynasındaki sıkışma dereceleri farklı  $m_i$  değerlerine bağlı olarak verilmiştir. Tünel duvarı ve tünel aynası için ayrı ayrı hesaplanan sıkışma dereceleri artan  $m_i$  değerleri ile birbirlerine yaklaşık paralel bir şekilde azalmıştır.



Şekil 5.7. Tünel duvarı ve aynasındaki birim deformasyonun farklı  $m_i$  değerleri ile ilişkisi

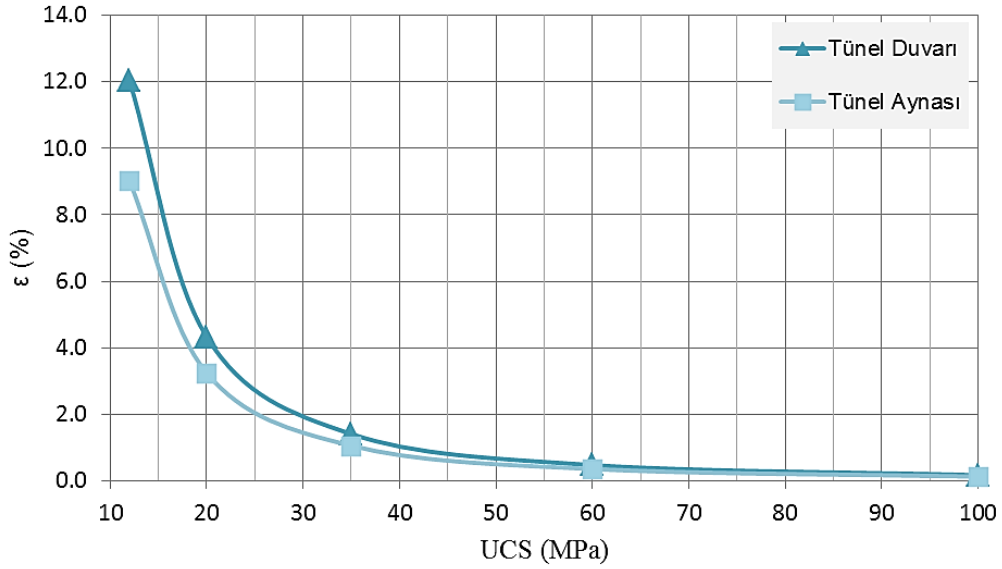


Şekil 5.8. Tünel duvarları ve aynasındaki sıkışma derecesinin farklı  $m_i$  değerleri ile değişimi

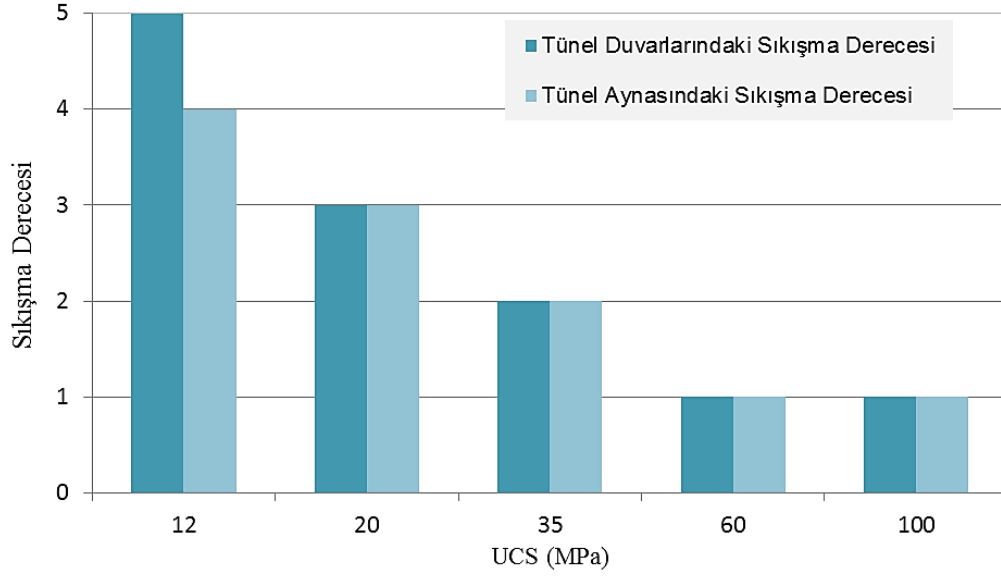
#### 5.4. UCS Parametrik Analizleri

Tünel duvarı ve aynasındaki birim deformasyonun farklı UCS değerleri için değişimi Şekil 5.9'da verilmiştir. Şekil 5.9'da görüldüğü gibi, UCS değerleri 12 MPa'dan 100 MPa'a artarken, tünel duvarındaki  $\varepsilon$  değerleri 12.03 m'den 0.17 m'ye, tünel aynasındaki  $\varepsilon$  değerleri ise 9.03 m'den 0.13 m'ye düşmüştür. UCS değerlerinin değişimi  $\varepsilon$  değerlerinin değişimini çok büyük ölçüde etkilemektedir.

Şekil 5.10'da ise, tünel duvarları ve tünel aynasındaki sıkışma dereceleri farklı UCS değerlerine bağlı olarak sunulmuştur. Tünel duvarlarındaki ve tünel aynası için ayrı ayrı hesaplanan sıkışma dereceleri artan UCS değerleri ile birbirlerine yaklaşık paralel şekilde azalmıştır. En düşük UCS değerinde tünel duvarlarındaki sıkışma derecesi 5, tünel aynasındaki sıkışma derecesi ise 4'tür. UCS değeri arttıkça, her iki sıkışma derecesi de aynı şekilde davranış göstererek 1. Seviyeye düşmüştür.



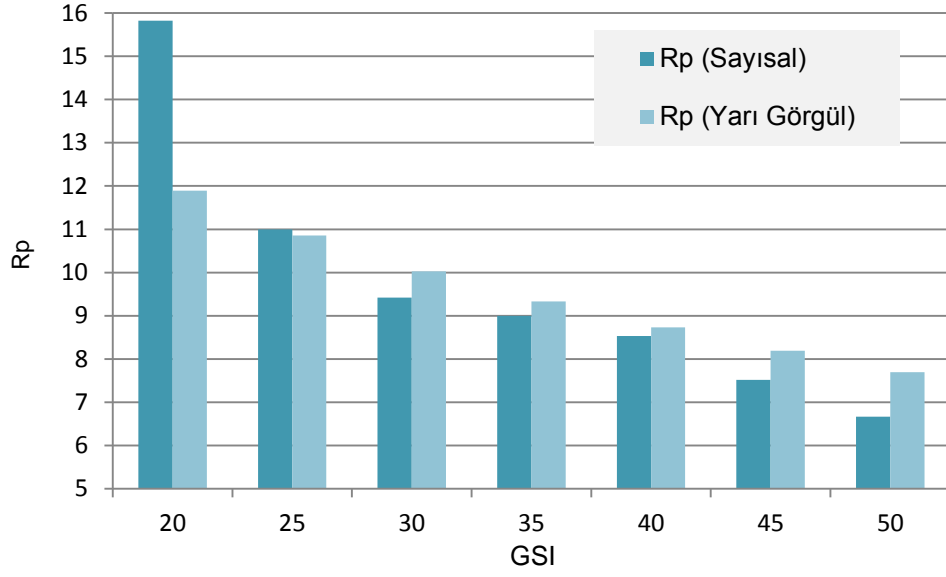
Şekil 5.9. Tünel duvarı ve aynasındaki birim deformasyonun farklı UCS değerleri ile ilişkisi



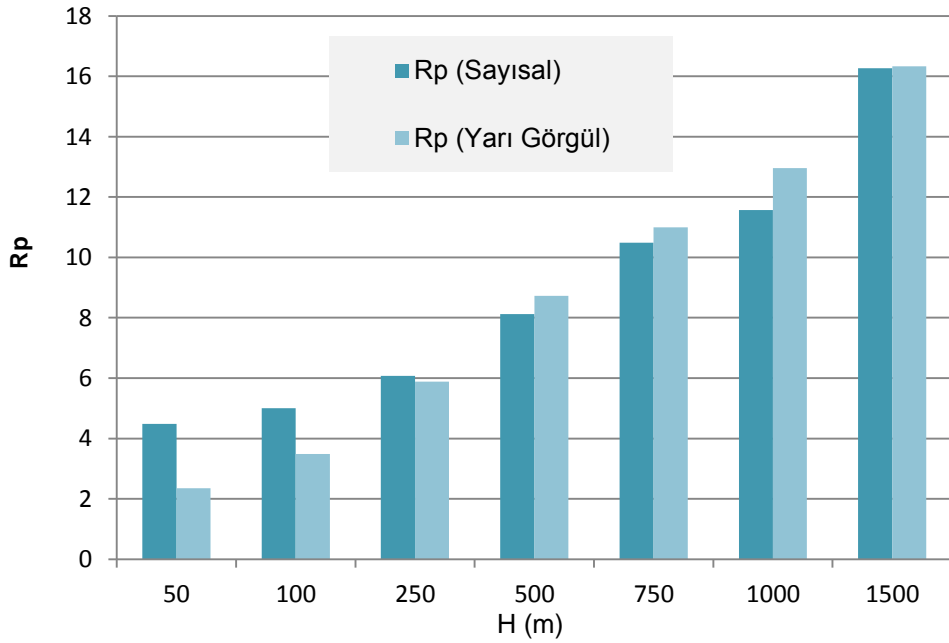
**Şekil 5.10.** Tünel duvarları ve aynasındaki sıkışma derecesinin farklı UCS değerleri ile değişimi

### 5.5. Plastik Bölge Kıyaslaması

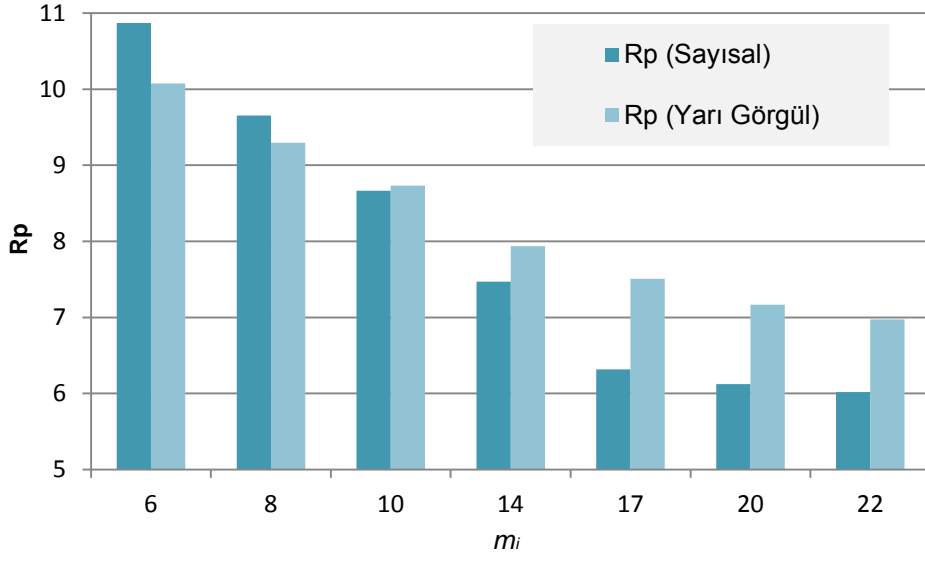
Sayısal analizlerden elde edilen plastik bölge yarıçap değerleri ile Hoek ve Marinos [10] yöntemi ile hesaplanan yarıçap değerleri farklı GSI, H,  $m_i$  ve UCS parametrelerine bağlı olarak karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar grafiksel olarak sırasıyla Şekil 5.11, 5.12, 5.13 ve 5.14'te verilmiştir. Grafikler incelendiğinde sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar ile yarı görgül yaklaşımlardan hesaplanan sonuçlar arasında bir uyum olduğu görülmektedir. Ancak sayısal analizlerden elde edilen değerlerin her zaman yarı görgül yaklaşımlardan hesaplanan değerlerden biraz daha az olduğu belirlenmiştir. Bu, sayısal analizlerin deformasyon değerlerinin üç boyutlu etkilerini göz önünde bulundurmasından kaynaklanmaktadır. Üç boyutlu analizlerde yay etkisi (arching effect), hesaplamalara dâhil olduğundan dolayı, iki boyutlu analizlere kıyasla küçük değerler vermektedir. Yay etkisi, yenilen bir jeomateryal kütle ve komşu sabit elemanlar arasındaki kuvvetler transferi olarak tanımlanabilir. Bu etki sonucunda jeomateryal kütle içersindeki stres dağılımında değişiklikler gözlenir [31].



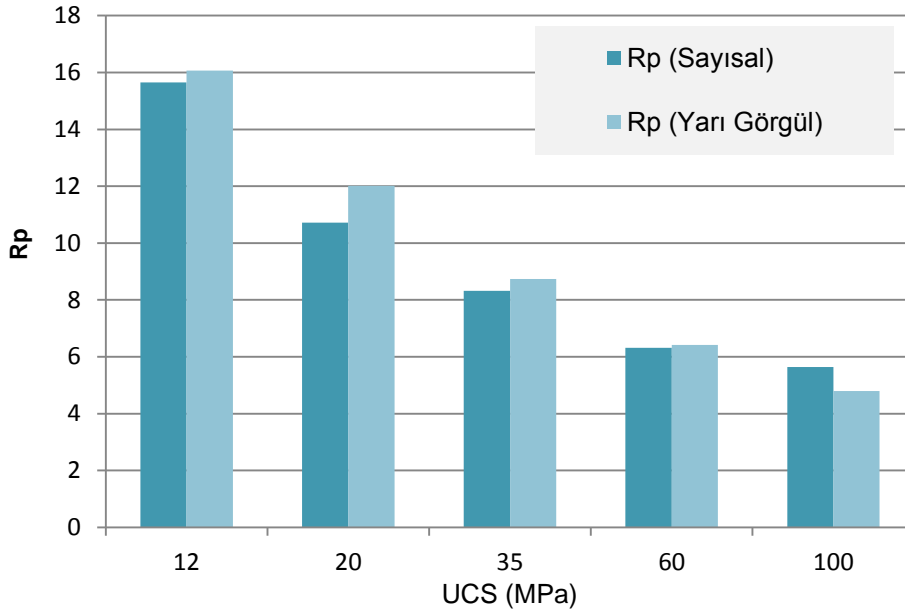
**Şekil 5.11.** Sayısal ve yarı görgül yaklaşımlardan hesaplanan plastik yarıçap değerlerinin farklı GSI değerleri ile değişimi



**Şekil 5.12.** Sayısal ve yarı görgül yaklaşımlardan hesaplanan plastik yarıçap değerlerinin farklı H değerleri ile değişimi



**Şekil 5.13.** Sayısal ve yarı görgül yaklaşımlardan hesaplanan plastik yarıçap değerlerinin farklı  $m_i$  değerleri ile değişimi



**Şekil 5.14.** Sayısal ve yarı görgül yaklaşımlardan hesaplanan plastik yarıçap değerlerinin farklı UCS değerleri ile değişimi

## 6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, sıkışan zeminler için önerilen yarı görgül yaklaşım ile birlikte sayısal analizlerden yararlanarak sıkışma potansiyeli olan ortamların davranışının daha iyi anlaşılması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Değişen GSI değerlerinin deformasyona etkisi sayısal analizler ile incelenmiş, GSI değeri arttıkça tünel etrafındaki deformasyonlarda ciddi miktarda azalma olduğu belirlenmiştir. Böylece GSI'nın tünel etrafındaki deformasyonlar üzerinde etkili bir parametre olduğu ortaya konulmuştur.
- H arttıkça tünel etrafındaki deformasyonların hızla yükseldiği belirlenmiştir. Böylece örtü kalınlığının deformasyon üzerinde etkili bir parametre olduğu ortaya koyulmuştur.
- UCS değeri arttıkça tünel etrafındaki deformasyonlarda ciddi miktarda azalma olduğu belirlenmiştir. Böylece UCS'deki az bir değişimin bile deformasyonları çok ciddi derecede etkilediği ortaya koyulmuştur.
- $m_i$  değerinin etkisi deformasyon konturları üzerinde araştırılmış,  $m_i$  değeri artarken, deformasyon değerlerinde diğer parametrelere kıyasla çok az düşüş olduğu belirlenmiştir. Böylece  $m_i$  değerinin sıkışma potansiyeline etkisinin göz önünde bulundurulacak kadar önemli bir parametre olmadığı ortaya konulmuştur.
- Çalışmada incelenen parametrelerden GSI, UCS ve H'nin, deformasyon değerleri üzerinde en etken parametreler olduğu tespit edilmiştir.
- GSI değeri arttıkça (20'den 50'ye) tünel etrafındaki plastik bölge kalınlığında, deformasyonda da olduğu gibi, ciddi miktarda azalma (15 m'den 6 m'ye) tespit edilmiştir. Böylece GSI değerinin plastik bölge kalınlığı üzerinde etkili bir parametre olduğunu ortaya koyulmuştur.
- Örtü kalınlığı arttıkça plastik bölge kalınlığı değerinin 4 m'den 16 m'ye çıktığı tespit edilmiştir. Böylece örtü kalınlığının plastik bölge üzerinde etkili bir parametre olduğu ortaya koyulmuştur.
- UCS değeri arttıkça (5 MPa'dan 100 MPa'a) tünel etrafındaki plastik bölge kalınlığı değerinin (23 m'den 5 m'ye) azaldığı tespit edilmiştir. Böylece UCS



- değerinin plastik bölge kalınlığı üzerinde etkili bir parametre olduğu ortaya koyulmuştur.
- $m_i$  değeri arttıkça (6'dan 22'ye) plastik bölge kalınlığı değerlerinin azaldığı (10 m'den 6 m'ye) tespit edilmiştir. Plastik bölgenin büyüklüğünde  $m_i$  değerinin artışıyla bir değişim gözlemlenmekle birlikte, belirlenen bu değişim  $m_i$  parametresinin plastik bölge üzerinde çok da etkili bir parametre olmadığı ortaya koyulmuştur.
  - Plastik bölge yarıçapı analizleri sonucu, deformasyon analizleri sonucuyla paralel bir şekilde, çalışmada incelenen parametreler arasında GSI, UCS ve H'in en etken parametreler olduğu ortaya konulmuştur.
  - Sayısal analizlerde GSI değerleri 20'den 50'ye artarken tünel duvarındaki birim deformasyon değerlerinin tünel duvarında 4.2 m'den 0.9 m'ye, tünel aynasında ise 3.1 m'den 0.7 m'ye düştüğü tespit edilmiştir. Böylece, GSI değerlerinin değişiminin birim deformasyon değerlerinin değişimini büyük ölçüde etkilediği ortaya konulmuştur. Tünel duvarı ve tünel aynasındaki sıkışma derecelerinin artan GSI değerleri ile yaklaşık olarak birbirine paralel şekilde azaldığı tespit edilmiştir.
  - Sayısal analizlerde örtü kalınlığı değerleri 50 m'den 1500 m'e artarken tünel duvarındaki birim deformasyonun 0.014 m'den 12.73 m'ye, tünel aynasındaki birim deformasyonun ise 0.011 m'den 9.545 m'ye arttığı tespit edilmiştir. Böylece, örtü kalınlığı değerlerinin değişiminin birim deformasyon değerlerinin değişimini büyük ölçüde etkilediği ortaya konulmuştur. Tünel duvarı ve tünel aynasındaki sıkışma derecelerinin artan örtü kalınlığı değerleri ile yaklaşık olarak birbirine paralel şekilde arttığı tespit edilmiştir.
  - Sayısal analizlerde UCS değerleri 12 MPa'dan 100 MPa'a artarken, tünel duvarındaki birim deformasyon değerlerinin 12.03 m'den 0.17 m'ye, tünel aynasındaki birim deformasyon değerlerinin ise 9.03 m'den 0.13 m'e düştüğü tespit edilmiştir. UCS değerlerinin değişiminin birim deformasyon değerlerinin değişimini çok büyük ölçüde etkilediği ortaya konulmuştur. Tünel duvarı ve tünel aynasındaki sıkışma dereceleri artan UCS değerleri ile yaklaşık olarak birbirine paralel şekilde azaldığı tespit edilmiştir.
  - Sayısal analizlerde  $m_i$  değerleri 6'dan 22'ye çıkarken, tünel duvarındaki birim deformasyon değerlerinin 2.34 m'den 0.64 m'ye, tünel aynasındaki birim

deformasyon değerlerinin ise 1.75 m'den 0.48 m'e düştüğü tespit edilmiştir.  $m_i$  değerlerinin değişiminin birim deformasyon değerlerinin değişimini etkilediği ancak değerler arasındaki farkın çok büyük olmadığı belirlenmiştir. Tünel duvarı ve tünel aynası için ayrı ayrı hesaplanan sıkışma derecelerinin artan  $m_i$  değerleri ile, birbirlerine yaklaşık paralel bir şekilde azaldığı tespit edilmiştir.

- Sayısal ve yarı görgül yaklaşımlardan hesaplanan plastik bölge yarıçap değerleri farklı GSI, H,  $m_i$  ve UCS değerleri ile değişimi incelenmiş, sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar ile yarı görgül yaklaşımlardan hesaplanan sonuçlar arasında bir uyum olduğu ortaya konulmuştur. Ancak, sayısal analizlerden elde edilen değerlerin her zaman yarı görgül yaklaşımlardan hesaplanan değerlerden biraz daha az olduğu belirlenmiştir.

Son olarak, duyarlılık analizleri yapılan dört faktörden GSI, UCS ve H değerlerinin sıkışma potansiyelinde çok önemli rol oynadığı ortaya konulmuştur. Buna göre bir tünel projesinde sıkışma olasılığını araştırmak için GSI ve UCS değerlerini ölçmek konusunda çok dikkatli olunması gerektiği tavsiye edilmektedir. Çünkü ölçümlerdeki en küçük sapmanın bile farklı ve yanlış sonuçlara neden olacağı bu çalışmada ortaya konulmuştur.

$m_i$  parametresinin etkisi az olarak belirlenmiş olsa da, sabit alınan parametreler değiştiğinde  $m_i$  parametresinin etkisinin de değişeceği göz önüne alındığında bu konu ile ilgili daha detaylı yapılacak olan çalışmalar parametrenin etkisini daha net bir şekilde ortaya koyacaktır.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara dayanılarak araştırmanın geliştirilmesi için aşağıdaki öneriler yapılmıştır:

- $m_i$  parametresinin etkisinin daha detaylı araştırılması,
- Benzer bir çalışmanın Mohr-Coloumb parametrelerine göre de yapılması ve gelecekte yapılacak olan tünel projelerinde sıkışma olasılığını araştırmak için kullanılması,
- Tünel kazılarında gözenek suyu basıncının (pore pressure) sıkışma üzerindeki etkisinin detaylı bir şekilde araştırılması.

## KAYNAKLAR

- [1] Barla G., Tunneling Under Squeezing Rock Conditions, *Kolymbas D (ed) Tunneling Mechanics*, Eurosummer School, Logos Verlag, Innsbruck, 169-268, **2001**.
- [2] Terzaghi K., Rock defects and loads in tunnel supports, *Rock tunneling with steel supports*, Youngstown, Ohio, R.V. Proctor and T.L. White, eds., The Commercial Shearing and Stamping Co., 17-99, **1946**.
- [3] Jethwa, J. L., Singh, B., Mithal, R.S., Influence of geology on tunnelling conditions and deformational behaviour of supports in faulted zones — A case history of the Chhibro-Khodri tunnel in India, *Engineering Geology*, 16, 3-4, 291-319, **1980**.
- [4] Singh, B., Jethwa, J.L., Dube, A.K., Correlation between observed support pressure and rock mass quality, *Tunneling and Underground Space Technology*, 7, 59-74, **1992**.
- [5] Aydan, Ö., Akagi, T., Kawamoto, T., The Squeezing Potential of Rocks Around Tunnels; Theory and Prediction, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 26(2), 137-163, **1993**.
- [6] Hasanpour R., Evaluation of Applicability of Double Shield Tunnel Boring Machines (DS-TBM) in Potentially Squeezing Grounds, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2013**.
- [7] International Society for Rock Mechanics (ISRM), *Rock Characterization Testing and Monitoring*, New York: Pergamon Press., 211, **1981**.
- [8] ITA, Long traffic tunnels at great depth, ITA Working group N°17, Long tunnels at great depth, ITA Lausanne, **2003**.
- [9] Goel, R.K., Jethwa, J.L., Paithakan, A.G., Tunneling through the young Himalayas-a case history of the Maneri-Uttarkashi power tunnel, *Engineering Geology*, 39, 31-44, **1995**.

- [10] Hoek, E., Marinos, P., Predicting Tunnel Squeezing, *Tunnels and Tunneling International*, Part 1-November2000, Part 2-December2000, **2000**.
- [11] Hoek, E., Brown, E.T., Underground Excavations in Rock, *Instn Min. Metall*, London, **1980**.
- [12] Hoek E., Brittle failure of rock, *In Rock Mechanics in Engineering Practice*, London, Wiley, 99-124, **1968**.
- [13] Bienawski, Z.T., Rock mass classification in rock engineering, *Exploration for Rock Engineering, Proc. of the Symp., (ed. Z.T. Bieniawski) 1*, Cape Town, Balkema, 97-106, **1976**.
- [14] Hoek, E., Wood, D., Shah, S., A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses, *Proc. Rock Characterization, Symp. Int. Soc. Rock Mech.:Eurock'92, (ed. J.A. Hudson)*, London, Brit. Geotech. Soc., 209-214, **1992**.
- [15] Hoek, E., Strength of jointed rock masses, *23rd Rankine Lecture*, *Geotechnique* 33, 3, 187-223, **1983**.
- [16] Ucar, R., Determination of shear failure envelope in rock masses, *J. Geotech. Engg. Div. ASCE.*, 112, 3, 303-315, **1986**.
- [17] Londe, P., Discussion on the determination of the shear stress failure in rock masses, *J. Geotech. Engg. Div. ASCE.*, 112, 3, 374-6, **1988**.
- [18] Hoek, E., Strength of rock and rock masses, *ISRM News Journal*, 2, 2, 4-16, **1994**.
- [19] Hoek, E., Brown, E.T., Practical estimates or rock mass strength, *Intnl. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts*, 34, 8, 1165-1186, **1997**.
- [20] Hoek, E., Kaiser, P.K., Badwen, W.F., Support of underground excavations in hard rock, *Balkema*, Rotterdam, **1995**.
- [21] Hoek, E., Marinos, P., Benissi, M., Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens

- Schist Formation, *Bull. Engg. Geol. Env.*, 57, 2, 151-160, **1998**.
- [22] Marinos, P., Hoek, E., Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch., *Bulletin of the International Association of Engineering Geologists*, **2001**.
- [23] Sonmez, H., Ulusay, R., Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36, 743-760, **1999**.
- [24] Hoek, E., Diederichs, M.S., Empirical estimation of rock mass modulus, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 43, 203-215, **2006**.
- [25] Hoek, E., Carranza, C., Corkum, B., Hoek-Brown failure criterion, *Proc. NARMS-TAC Conference*, 1, 267-273, **2002**.
- [26] Barton, N., Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, *Rock Mechanics*, 6(4), 189-236, **1974**.
- [27] Jethwa, J.L., Estimation of ultimate rock pressure for tunnel linings under squeezing rock conditions-a new approach., *Design and Performance of Underground Excavations*, Cambridge, ISRM Symposium, 231-238, **1984**.
- [28] Hoek E., Reliability of Hoek-Brown estimates of rock mass properties and their impact on design, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 35, 63-68, **1998**.
- [29] Itasca, FLAC3D, Fast Lagrangian analysis of continua in 3D dimensions, *User's guide*, **2006**.
- [30] Sonmez, H., Investigation of the applicability of the Hoek–Brown criteria to the failure behaviour of the fissured clays, Ph.D. Thesis, Hacettepe University, Ankara, **2001**.
- [31] Tien, Hsien-Jen, A literature study of the arching effect, MSc Thesis, Massachusetts

Institute of Technology, **1996**.

- [32] Hoek, E., Marinos, P., Predicting tunnel squeezing, *Tunnels and Tunneling International*, Part 1 and Part 2, **2000**.
- [33] Hoek, E., Brown, E.T., Empirical strength criterion for rock masses, *J. Geotech. Engng Div.*, 106(GT9), 1013-1035, **1980**.
- [34] Marinos, P., Hoek, E., A geologically friendly tool for rock mass strength estimation, *Proc. GeoEng2000 Conference*, Melbourne, **2000**.
- [35] Sonmez, H., Ulusay, R., A discussion on the Hoek–Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies, *Yerbilimleri* 26, 77-99, **2002**.

# ÖZGEÇMİŞ

## Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Cansın YÜKSEL

Doğum Tarihi: 26.11.1990

Doğum Yeri : Ankara

Medeni Hali : Bekar

E-posta : cansinyuksel@gmail.com

Adresi : 886.Sok 6/3 Ersoy Apt., Keklik Pınarı  
Çankaya / ANKARA

## Eğitim

Lise : Mehmet Emin Resulzade Anadolu Lisesi

Lisans : Hacettepe Üniversitesi (Maden Mühendisliği Bölümü)  
Miskolc Üniversitesi (Maden Mühendisliği Bölümü)

## Yabancı Dil Düzeyi

İngilizce (İleri Seviye)

Rusça (Başlangıç)

## İş Deneyimi

- Suda Maden A.Ş 2012-~
- Antalya Mermer (Staj) 2010
- TKİ-Soma Kömür İşletmeleri (Staj) 2009

## Başarılar

2010/2011 Akademik Yılı, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Bölüm Üçüncülüğü