

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KAYA OYMA YAPI DAVRANIŞININ SAYISAL ANALİZLER İLE
İNCELENMESİ**

Bahar YAMAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Programı

Danışman

Prof. Dr. Mehmet M. BERİLGİN

Şubat, 2020

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KAYA OYMA YAPI DAVRANIŞININ SAYISAL ANALİZLER İLE
İNCELENMESİ**

Bahar YAMAN tarafından hazırlanan tez çalışması çalışması 21.02.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mehmet M. BERİLGİN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Mehmet M. BERİLGİN, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Pelin ÖZENER, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK, Üye

İstanbul Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet M. BERİLGEN'in danışmanlığında tarafımda hazırlanan Kaya Oyma Yapı Davranışının Sayısal Analizler ile İncelenmesi başlıklı tüm tezde veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Bahar YAMAN

İmza



Bu çalışma, TUBİTAK tarafından 118M321 numaralı proje ile desteklenmiştir.



*Aileme
ve
dostlarıma*

TEŞEKKÜR

Günümüzde ihtiyaçlar doğrultusunda yaygın olarak kullanılmaya başlayan yer altı yapılarının birçoğunu kaya ortamında açılanlar oluşturmaktadır. Açılan yer altı yapıları otel, müze, depo ve otopark gibi çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Ülkemizde Nevşehir Kapadokya bölgesinde depo ve yaşam amaçlı olarak inşa edilen kaya oyma yapılar yer altı yapılarının yaygın örneklerindendir.

Bu tez kapsamında sayısal analizlerle davranışı incelenen kaya oyma yapılarla ilgili yaptığım incelemede, bilgi birikimi ile bana her konuda destek olan, araştırma ve sorgulamanın önemini aşilayarak mühendislik bakış açısı kazandıran kıymetli tez danışmanım Prof. Dr. Mehmet M. BERİLGİN'e en içten dileklerle teşekkür eder, saygılarımı iletirim.

Yüksek lisans hayatım boyunca geoteknik alanında aklıma takılan her soruda fikrine danıştığım, yardımlarını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Murat E. SELÇUK'a, TÜBİTAK projesi kapsamında araştırma yaptığım bu konuda desteklerinden ötürü proje yürütücüsü Prof. Dr. Nabi YÜZER'e, jeolojik araştırmalarda gerekli literatür desteği sağlayan Doç. Dr. Ömer ÜNDÜL'e, geoteknik alanında bana tecrübe katan, bilgi alanımı genişleten, geoteknik anabilim dalında görev yapan saygıdeğer tüm akademisyenlere şükranlarımı iletirim.

Yaptıklarım ve yapacaklarımın her zaman arkasında olan, gerekli maddi ve manevi desteği sağlayan kıymetli aileme en içten sevgi ve şükranlarımı sunarım. Tezim boyunca her zaman yanımda olan, güzel işler başaracağımı söyleyerek bana her konuda destek olan değerli arkadaşlarım Zeynep MEŞE, Cansu SARI, Yusuf KAYA ve Ali Emir ŞİŞMAN'a içten dileklerle teşekkür ederim.

Bahar YAMAN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	3
2 KAYA MEKANİĞİ	4
2.1 Kayaların İndeks Özellikleri.....	4
2.1.1 Porozite	4
2.1.2 Birim Hacim Ağırlık, Yoğunluk.....	4
2.1.3 Hidrolik Permeabilite ve İletkenlik	5
2.1.4 Dayanım	5
2.2 Kayaçlarda Süreksizlik.....	7
2.3 Kayaçların Sınıflandırılması.....	9
2.3.1 Jeolojik Sınıflandırma	9
2.3.2 Kaya Kalite Göstergesine (RQD) Göre Sınıflandırma	12
2.3.3 Kaya Kütle Sınıflama Sistemleri.....	13
3 KAYADAN OYMA YAPILAR	21
3.1 Giriş.....	21
3.2 Kaya Kütle Etüdü.....	22
3.2 Oyma Yapı Tasarım ve Analizi.....	23
3.2.1 Depo Amaçlı Kayadan Oyma Yapıların Tasarım Esasları	24
3.3 Güçlendirme	27

4 SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ VE KAYA MALZEMESİ İÇİN BÜNYE MODELLERİ	28
4.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	28
4.2 Kaya Malzemesi için Bünye Modelleri	30
4.2.1 Lineer Elastik Bünye Modeli	30
4.2.2 İdeal Plastik Bünye Modeli	31
4.2.3 Hoek-Brown Bünye Modeli	32
5 SAYISAL ANALİZLER	34
5.1 Kaya Oyma Yapılarda Sayısal Modelleme.....	34
5.2 Örtü Kalınlığına göre Sayısal Analizler	36
5.2.1 Lineer Elastik Bünye Modeli Analiz Sonuçları	37
5.2.2 İdeal Plastik Bünye Modeli Analiz Sonuçları	41
5.2.3 Hoek-Brown Bünye Modeli Analiz Sonuçları	46
5.3 Bünye Modeline göre Sayısal Analizler	50
5.4 Duyarlılık ve Parametre Analizi.....	54
5.4.1 İdeal Plastik Bünye Modeli ile Sensitivite ve Parametre Analizi	55
5.4.2 Hoek-Brown Bünye Modeli ile Duyarlılık ve Parametre Analizi.....	60
6 ANALİZ SONUÇLARINA GÖRE GERİLME DEĞERİ DEĞİŞİMİ	66
6.1 Giriş.....	66
6.2 Örtü Yüküne Bağlı Gerilme Değerlerinin Değişimi	67
6.3 Kaya Oyma Yapılarda Gerilme İzleri.....	69
5.4 Güvenlik Analizi Sonuçları (Incremental Displacement).....	77
7 SONUÇLAR VE ÖNERİLER	78
Kaynakça	81
A Lineer Elastik Bünye Modeli Gerilme Değerleri	83
B İdeal Plastik Bünye Modeli Gerilme Değerleri	84
C Hoek-Brown Bünye Modeli Gerilme Değerleri	85
Tezden Üretilmiş Yayınlar	86

SİMGE LİSTESİ

σ_c	Basınç Gerilmesi
γ	Birim Hacim Ağırlık
J_w	Bir Metreküp Alandaki Çatlak Sayısı
R_w	Bozunma Puanı
s	Çatlaklar Arası Mesafe
σ_t	Çekme Gerilmesi
$\sigma_1-\sigma_3$	Deviatör Gerilme
Ψ	Dilatasyon Açısı
R_f	Dolgu Puanı
γ_{sat}	Doygun Birim Hacim Ağırlık
$(I_s)_{50}$	Düzeltilmiş Nokta Yük Dayanım İndeksi
F	Düzeltilme Katsayısı
J_a	Eklem Ayrışma Sayısı
J_r	Eklem Pürüzlülük Sayısı
J_w	Eklem Suyu Azaltma Faktörü
J_n	Eklem Takımı Sayısı
E	Elastisite Modülü
σ_1	En Büyük Asal Gerilme
σ_3	En Küçük Asal Gerilme
D_e	Eşdeğer Çap
ϕ	İçsel Sürtünme Açısı
A_i	İzdüşüm Alanı
γ_s	Kayma Şekil Değiştirmesi
m_b	Kaya Süreksizlik Katsayısı
P	Kırılma Yüğü
c	Kohezyon
a,s	Malzeme Sabitleri
D	Numune Çapı
W	Numune Genişliği
I_s	Nokta Yük Dayanım İndeksi
$(\sigma_1+\sigma_3)/2$	Ortalama Gerilme
B	Oyma Yapı Genişliği
H	Oyma Yapı Yüksekliği
e	Örtü Kalınlığı
D	Örselenme Faktörü
ν	Poisson Oranı
n	Porozite
R_r	Pürüzlülük Puanı
m_i	Som Kaya Parametre Katsayısı
w	Su Muhtevası
q_u	Tek Eksenli Basınç Dayanımı
u	Toplam Yer Değiştirme

KISALTMA LİSTESİ

GB	Güney Batı
GD	Güney Doğu
GS	Güvenlik Sayısı
GSI	Jeolojik Dayanım İndeksi
HB	Hoek-Brown
İP	İdeal Plastik
KB	Kuzey Batı
KD	Kuzey Doğu
KDÇ	Kritik Durum Çizgisi
KOY	Kayadan Oyma Yapılar
LE	Lineer Elastik
MC	Mohr-Coulomb
RMR	Kaya Kütle Sınıflaması
RQD	Kaya Kalite Göstergesi
SCR	Süreksizlik Yüzey Koşulu Puanı
SR	Yapısal Özellik Puanı
SRF	Gerilim Azaltma Faktörü
UCS	Tek Eksenli Basınç Dayanımı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Süreksizlik açısı ve dayanım arasındaki ilişki (Yıldırım ve Gökaşan, 2013).....	7
Şekil 2.2	Süreksizlik yönelimlerini gösteren örnek gül diyagramı (Sarı ve Çömlekçiler, 2006)	8
Şekil 2.3	Kayaç grupları arasındaki dönüşüm (Yıldırım ve Gökaşan, 2013)	9
Şekil 2.4	GSI sınıflama sistemi (Sönmez ve Ulusoy, 2002)	19
Şekil 3.1	Kayadan oyma bir yapı örneği.....	21
Şekil 3.2	Çok katlı kayadan oyma yapı (KOY Yönetmeliği, 2017)	24
Şekil 3.3	Depo amaçlı kayadan oyma yapı minimum kemer yüksekliği (KOY Yönetmeliği, 2017)	25
Şekil 4.1	Düzlem ve eksenel şekil değiştirme durumu (Plaxis manual, 2019)	29
Şekil 4.2	Sonlu elemanlar düğüm noktaları (Plaxis manual, 2019)	29
Şekil 4.3	Üç eksenli deney sonucu rijitlik modülleri (Plaxis manual, 2019)	31
Şekil 4.4	Hoek-Brown yenilme ölçütü (Plaxis manual, 2019)	32
Şekil 5.1	Kaya oyma yapı en kesitleri.....	35
Şekil 5.2	Kaya oyma yapı için oluşturulan sonlu elemanlar ağı.....	35
Şekil 5.3	(a) Kemer, (b) düzlem tavanlı oyma yapı için farklı örtü kalınlıklarında oluşan yer değiştirme dağılımları	37
Şekil 5.4	(a) Kemer, (b) düzlem tavanlı oyma yapı için farklı örtü kalınlıklarında oluşan kayma şekil değiştirmesi dağılımları.....	38
Şekil 5.5	(a) Kemer, (b) düzlem tavanlı oyma yapı için farklı örtü kalınlıklarındaki toplam asal gerilme dağılımları.....	39
Şekil 5.6	(a) Kemer, (b) düzlem tavanlı oyma yapı için farklı örtü kalınlıklarındaki toplam asal şekil değiştirme dağılımları.....	40
Şekil 5.7	(a) Kemer, (b) düzlem tavanlı oyma yapı için farklı örtü kalınlıklarında oluşan yer değiştirme dağılımları	42
Şekil 5.8	(a) Kemer, (b) düzlem tavanlı oyma yapı için farklı örtü kalınlıklarında oluşan kayma şekil değiştirmesi dağılımları.....	43
Şekil 5.9	(a) Kemer, (b) düzlem tavanlı oyma yapı için farklı örtü kalınlıklarındaki toplam asal gerilme dağılımları.....	44
Şekil 5.10	(a) Kemer, (b) düzlem tavanlı oyma yapı için farklı örtü kalınlıklarındaki toplam asal şekil değiştirme dağılımları	45
Şekil 5.11	(a) Kemer, (b) düzlem tavanlı oyma yapı için farklı örtü kalınlıklarında oluşan yer değiştirme dağılımları	46
Şekil 5.12	(a) Kemer, (b) düzlem tavanlı oyma yapı için farklı örtü kalınlıklarında oluşan kayma şekil değiştirmesi dağılımları.....	47
Şekil 5.13	(a) Kemer, (b) düzlem tavanlı oyma yapı için farklı örtü kalınlıklarındaki toplam asal gerilme dağılımları	48
Şekil 5.14	(a) Kemer, (b) düzlem tavanlı oyma yapı için farklı örtü kalınlıklarındaki toplam asal şekil değiştirme dağılımları	49
Şekil 5.15	Örtü kalınlığı (a) 15.0 m, (b) 30.0 m olduğunda oluşan plastik noktalar	50
Şekil 5.16	Bünye modellerine göre oyma yapı etrafında oluşan toplam yer değiştirme dağılımları.....	51
Şekil 5.17	Bünye modellerine göre oyma yapı etrafında oluşan toplam kayma şekil değiştirmesi dağılımları	52

Şekil 5.18	Bünye modellerine göre oyma yapı etrafında oluşan toplam asal gerilme dağılımları.....	53
Şekil 5.19	Bünye modellerine göre oyma yapı etrafında oluşan toplam asal birim şekil değiştirme doğrultuları.....	54
Şekil 5.20	İdeal plastik bünye modeli için sensitivite analizi ile elde edilen etken parametre yüzdeleri	56
Şekil 5.21	(a)Minimum, (b) maksimum durumda elde edilen toplam yer değiştirme dağılımları.....	56
Şekil 5.22	(a)Minimum, (b) maksimum durumda elde edilen toplam kayma şekil değiştirmesi dağılımları	57
Şekil 5.23	(a)Minimum, (b) maksimum durumda elde edilen toplam asal gerilme dağılımları (lineer elastik bünye modeli)	58
Şekil 5.24	(a)Minimum, (b) maksimum durumda elde edilen toplam asal şekil değiştirme dağılımları (lineer elastik bünye modeli)	59
Şekil 5.25	Hoek-Brown bünye modeli için sensitivite analizi ile elde edilen etken parametre yüzdeleri	61
Şekil 5.26	(a)Minimum, (b) maksimum durumda elde edilen toplam yer değiştirme dağılımları.....	62
Şekil 5.27	(a)Minimum, (b) maksimum durumda elde edilen toplam kayma şekil değiştirmesi dağılımları	63
Şekil 5.28	(a)Minimum, (b) maksimum durumda elde edilen toplam asal gerilme dağılımları.....	64
Şekil 5.29	(a)Minimum, (b) maksimum durumda elde edilen toplam asal şekil değiştirme dağılımları.....	65
Şekil 6.1	Oyma yapı etrafında seçilen kritik noktalar	66
Şekil 6.2	Kemer tavanlı oyma yapı için gerilme izleri (e=5,0 m)	70
Şekil 6.3	Düzlem tavanlı oyma yapı için gerilme izleri (e=5,0 m).....	72
Şekil 6.4	Kemer tavanlı oyma yapı kritik için gerilme izleri(e=15,0 m)	73
Şekil 6.5	Düzlem tavanlı oyma yapı için gerilme izleri (e=15,0 m)	74
Şekil 6.6	Kemer tavanlı oyma yapı için gerilme izleri (e=30,0 m)	75
Şekil 6.7	Düzlem tavanlı oyma yapı için gerilme izleri (e=30,0 m)	76
Şekil 6.8	Örtü kalınlığı genişlik oranına bağlı güvenlik sayısı değişimi (Hoek-Brown Bünye Modeli)	77

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Kaya sınıflama sistemi (Karaman ve Kesimal, 2012)	6
Tablo 2.2	Kaya davranışlarına göre jeolojik sınıflandırma (Goodman, 1989)	11
Tablo 2.3	Kaya kalite göstergesi (Deere, 1989)	13
Tablo 2.4	Q sınıflama sisteminde kullanılan değerler (DLH Yönetmeliği, 2007)	14
Tablo 2.5	RMR sınıflama sisteminde kullanılan değerler (DLH Yönetmeliği, 2007)	17
Tablo 3.1	Kayadan oyma yapılarda açılacak minimum sondaj sayıları (KOY Yönetmeliği, 2017)	22
Tablo 3.2	Depo amaçlı kayadan oyma yapı minimum duvar kalınlıkları (KOY Yönetmeliği, 2017)	26
Tablo 3.3	Taşıyıcı sistem olması durumunda kaya kütle özelliklerinin elde edilmesinde kullanılacak katsayılar (KOY Yönetmeliği, 2017)	26
Tablo 5.1	Sayısal analizlerde kullanılan malzeme parametre değerleri	36
Tablo 5.2	Lineer elastik bünye modeli toplam yer değiştirme değerleri	37
Tablo 5.3	Lineer elastik bünye modeli kayma şekil değiştirmesi değerleri	38
Tablo 5.4	Lineer elastik bünye modeli toplam asal gerilme değerleri	39
Tablo 5.5	Lineer elastik bünye modeli toplam asal şekil değiştirme değerleri	41
Tablo 5.6	İdeal plastik bünye modeli toplam yer değiştirme değerleri	42
Tablo 5.7	İdeal plastik bünye modeli kayma şekil değiştirmesi değerleri	43
Tablo 5.8	İdeal plastik bünye modeli toplam asal gerilme değerleri	44
Tablo 5.9	İdeal plastik bünye modeli toplam asal birim şekil değiştirme değerleri	45
Tablo 5.10	Hoek-Brown bünye modeli toplam yer değiştirme değerleri	46
Tablo 5.11	Hoek-Brown bünye modeli kayma şekil değiştirmesi değerleri	47
Tablo 5.12	Hoek-Brown bünye modeli toplam asal gerilme değerleri	48
Tablo 5.13	Hoek-Brown bünye modeli toplam asal birim şekil değiştirme değerleri	49
Tablo 5.14	İdeal plastik bünye modeli duyarlılık analizi parametre değerleri	55
Tablo 5.15	Hoek-Brown bünye modeli duyarlılık analizi parametre değerleri	60
Tablo 6.1	Lineer elastik analizler sonucunda elde edilen düşey ve yanal gerilme değerleri	68
Tablo 6.2	İdeal plastik analizler sonucunda elde edilen düşey ve yanal gerilme değerleri	68
Tablo 6.3	Hoek-Brown analizleri sonucunda elde edilen düşey ve yanal gerilme değerleri	69
Tablo 6.4	Kemer tavanlı oyma yapı kritik durum gerilme değerleri (e=5,0 m)	70
Tablo 6.5	Düzlem tavanlı oyma yapı kritik durum gerilme değerleri (e=5,0 m)	72
Tablo 6.6	Kemer tavanlı oyma yapı kritik durum gerilme değerleri (e=15,0 m)	73
Tablo 6.7	Düzlem tavanlı oyma yapı kritik durum gerilme değerleri (e=15,0 m)	74
Tablo 6.8	Kemer tavanlı oyma yapı kritik durum gerilme değerleri (e=30,0 m)	75
Tablo 6.9	Düzlem tavanlı oyma yapı kritik durum gerilme değerleri (e=30,0 m)	76

Kaya Oyma Yapı Davranışının Sayısal Analizler ile İncelenmesi

Bahar YAMAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Mehmet M. BERİLGİN

Dünyada nüfusun hızlı artması, yerleşim alanlarının azalması, barınma ihtiyacının artması gibi birçok neden yer altı yapı kullanımının yaygınlaşmasına sebep olmuştur. Ülkemizde Nevşehir'in Kapadokya Bölgesi jeolojik yapısının verdiği imkan ile yeraltı yapısı tesis edilmesine çok müsait olduğundan bölgede yaşayan insanlar tarafından kayadan oyma yaşam ve depo alanları inşa edilmiştir. Gerekli mühendislik hizmetleri alınmadan tasarlanan bu yapılar bölge insanının geçmiş kuşaklardan aktarılan deneyimleri ile yapılmaktadır. Geçmişte insan gücü ve ilkel aletler ile yapılan kaya oyma işleri günümüzde gelişmiş kazı makineleri ile yapılmaktadır. Bölgede inşa edilen kayadan oyma yapıların mühendislik tasarımı yapılmadan tecrübe ile açılması bu yapıların güvenlik düzeyinin belirsiz olduğu ve gerekli mühendislik hizmetlerine ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Bu durum yetkililerce de tespit edildiğinden 2017 yılında Kayadan Oyma Yapılar Yönetmeliği çıkarılmıştır. Bu yönetmelik Türkiye'de inşa olunacak kayadan oyma yapılar için yapılması gereken mühendislik hizmetlerini ve tasarım koşullarını içermektedir.

Bu bağlamda, Kapadokya Bölgesi'nde inşa edilmiş kayadan oyma yapıların bilimsel olarak incelenmesi ve bunların Kayadan Oyma Yapılar Yönetmeliği çerçevesinde değerlendirilmesi ihtiyacı doğmuştur. Bu ihtiyaçtan yola çıkarak bu tezde Nevşehir Kapadokya bölgesinde yapılan kaya oyma yapı davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. İncelemenin ilk aşamasında yer altı yapıları ile ilgili literatür taraması yapılmıştır. İkinci aşama olarak kayanın mekanik ve fiziksel özellikleri araştırılmıştır. Sayısal analizlerde iki farklı tip oyma yapı, farklı örtü kalınlıklarında modellenmiştir. Lineer elastik, ideal plastik ve Hoek-Brown bünye modelleri kullanılarak yapılan analizlerde yer değiştirme, gerilme ve kayma şekil değiştirmesindeki değişim incelenmiştir. Bunlara ek olarak sensitivite ve parametre analizi yapılmıştır. Oyma yapı etrafındaki kritik noktalar belirlenmiş ve bu noktalardaki göçme durumu incelenmiştir. Hoek-Brown bünye modeli ile farklı H/B ve e/B oranları için güvenlik analizi yapılmıştır.

Yapılan tüm sayısal incelemeler sonucunda örtü kalınlığının artması ile yer değiştirme, gerilme ve şekil değiştirmelerin arttığı belirlenmiştir. Ortam rijitliğinin yer değiştirmeleri etkilediği belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda elde edilen ve önerilen bilgiler Sonuç ve Öneriler kısmında verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaya, yer altı yapısı, kaya oyma yapılar, sayısal analiz

Investigation of Rock Cavern Structure with Numerical Analysis

Bahar YAMAN

Department of Civil Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Prof. Dr. Mehmet M. BERİLGİN

Many reasons such as the rapid increase of the population in the world, the decrease of residential areas and the need for housing have caused the use of underground structures to become widespread. The geological structure of the Cappadocia Region of Nevşehir in our country is very suitable for the establishment of underground structure. Volcanic tuff, which can be easily processed, has been carved by the people of the region and these structures have been established. These structures designed without the necessary engineering services are built with the experiences of the people of the region transferred from the past generations. In the past, rock cavern structure are built with man-made and primitive tools, nowadays built with advanced excavation machines. The safety level of rock cavern structure established without engineering design and these structure required engineering services. Since this was also detected by the competents, the Regulation of Rock Cavern Structures was issued in 2017. This regulation includes engineering services to be performed and design requirements for rock cavern structure built in Turkey. In this context, the need to scientifically

examine the rock cavern structures built in the Cappadocia region and to evaluate them within the framework of the Regulation of Rock Cavern Structures emerged. Based on this need, the aim of this thesis is to investigate the behavior of rock cavern structures in Nevşehir Cappadocia region. In the first stage of the study, a literature review was performed about rock cavern structures. As a second step, the mechanical and physical properties of the rock were investigated. In numerical analysis, two different types of cavern structure are modelled at different cover thicknesses. Displacement, stress and shear deformation evaluated with using linear elastic, ideal plastic and Hoek-Brown models. In addition, sensitivity and parameter analysis were performed. Critical points around the cavern structure were identified and the failure state at these points were evaluated. Safety analysis were performed for different H/B and e/B ratios with using Hoek-Brown model.

As a result of all numerical investigations, displacement, stress and deformations have been increased with the increase of the cover thickness. Rigidity of rock were affected displacements. The information obtained and suggested as a result of the analyses are given in the Results and Suggestions section.

Keywords: Rock, underground structure, rock cavern structure, numerical analysis

1.1 Literatür Özeti

Varlığı yıllar öncesine dayanan yer altı yapıları, günümüzde de ihtiyaçlar doğrultusunda kullanılmaya devam etmektedir. Dünyada nüfusun hızlı artması, yerleşim alanlarının azalması, barınma ihtiyacının artması gibi birçok neden yer altı yapı kullanımının yaygınlaşmasına sebep olmuştur.

Yer altı yapıları yaşam, otopark, depo, enerji santrali, maden kazası gibi birçok farklı amaç sonucunda ortaya çıkabilmektedir. Kaya mekaniğinin başlangıcı ile yaygınlaşan bir araştırma konusu olan yer altı yapılarında, en temel yaklaşım stabilitenin sağlanmasıdır.

Usmani, Pal ve Nanda (2018) tarafından yapılan çalışmada, desteksiz bir yer altı yapısı modellenmiş ve kazı sonrasında yeniden gerilme dağılımı olduğu gözlenmiştir. Yeniden gerilme dağılımlarının oluşması da, yer altı yapılarında kazıdan sonra stabiliteyi sağlamanın önemli bir etken olduğu sonucunu ortaya çıkartmaktadır.

Kaya oyma yapılarda stabilitenin sağlanması için yapılması gereken en önemli araştırma, kaya ortamının fiziksel ve mekanik özelliklerinin doğru belirlenmesidir. Wu, Zhang ve Li (2012), Gao, Deng ve Meng (2012) yaptıkları yer altı çalışmalarında, deformasyon ve gerilmeler üzerinde kaya kütle özelliklerinin ve yapısal planın önemli olduğunu ortaya koymuştur.

Kaya kütle özelliklerini belirleyen en önemli durum ortamda var olabilecek süreksizliklerdir. Süreksizlikler fay, eklem, fissür, dayk ve sill gibi birçok farklı şekilde oluşabilmektedir (Yıldırım ve Gökaşan, 2013).

Yer altı yapılarında süreksizliklerin etkisini inceleyen birçok farklı çalışma bulunmaktadır. Bhatkar, Usmani, Mandal ve Nanda (2018) desteksiz olarak açılan bir yer altı yapısında meydana gelen kama tipi bir göçmeyi incelemiş ve bu

göçmeye sebep olan etkenlerin ortamda var olan süreksizlikler olduğunu belirlemiştir. Süreksizlikler ile ilgili benzer bir çalışma Usmani vd. (2018) tarafından yapılmıştır. Örnek bir yer altı yapısı sürekli ve süreksiz ortam olarak modellenmiş, yer değiştirme ve gerilme değerlerinin değişimi incelenmiştir. Ortamın sürekli olarak modellenmesi durumunda daha küçük gerilme ve yer değiştirmelerin oluştuğunu, süreksiz ortamda meydana gelen yer değiştirme büyüklüklerinin arttığını ve gerilmelerin süreksizlikler ile birlikte geniş bir alana yayıldığını göstermişlerdir.

Kaya kütle özelliklerinin önemini belirten bir diğer çalışma 2016 yılında Wu vd. tarafından yapılan yer altı enerji santralinin etrafındaki kaya davranış özelliklerinin belirlenmesidir. Yer altı yapısı etrafındaki kaya özelliklerinin kazı ile birlikte değişimi incelenmiş ve kazı boyunca yer altı yapısı etrafında büyük deformasyonların, çatlakların ve gerilme artışlarının oluştuğu gözlenmiştir.

Kaya ortamının anizotropik olması ve heterojen olması kaya davranışın anlaşılmasını ve yer altı yapılarının modellenebilmesini güçleştirmektedir. Bu karmaşıklık nümerik yöntemlerin gelişmesi ile biraz daha azalmıştır. Yong vd. (2019) tarafından yapılan nümerik bir çalışmada, sonlu farklar yöntemi ile eklem içeren kaya ortamında bir yer altı yapısı modellenmiştir. Yapılan sayısal modelleme sonucunda yapı etrafında oluşan gerilme ve yer değiştirme sonuçları değerlendirilmiştir. En büyük yer değiştirmelerin model taç ve taban kısımlarında meydana geldiği, en büyük asal gerilmelerin dairesel modelin tüm çevresinde oluştuğu, minimum asal gerilmelerin ise yan yüzeylerde oluştuğu gözlenmiştir.

Genel olarak yapılan tüm çalışmalar incelendiğinde yer altı yapılarında gerilme ve deformasyon durumları incelenmiş, kaya ortamı özelliklerinin bu değerler üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Kaya ve kaya ortamında yapılacak yapı davranışını belirlemek güncel araştırma konularındandır. Bu tez kapsamında kaya ortamında inşa edilen oyma yapı davranışının araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda 2017 yılında yayınlanan Kayadan Oyma Yapılar yönetmeliği kullanılarak, farklı tip ve farklı örtü

yüksekliklerinde ki oyma yapıların gerilme, yer değiştirme ve şekil değiştirme durumlarının farklı zemin bünye modelleri kullanılarak değerlendirilmesi planlanmıştır.

1.3 Hipotez

Kaya oyma yapıların stabilitesini ve açıldığı kayanın kendi ağırlığı altında, açma sırasında oluşan gerilmeler, şekil değiştirmeler ve yer değiştirmeler önemlidir. Tasarımda dikkate alınması gereken bu büyüklükler ortamın elastik ve plastik davranışından etkilenmektedir. Bu durum elastik ve elasto-plastik bünye modelleri dikkate alınarak sayısal analizler ile incelenebilir.



2.1 Kayaların İndeks Özellikleri

Tek bir mineralin çok sayıda birleşmesinden veya çeşitli minerallerin birleşiminden oluşan kristalli ve taneli sert ortamlara kaya (kayaç) adı verilir. Açık maden işletmelerinde duraylı kaya şevler düzenlenmesinde, kayada açılan yer altı yapıları ve tünel davranışı, baraj tipi seçimi gibi birçok farklı alanda kaya mekaniği prensiplerinden yararlanılır. Bu tarz yapılarda ekonomik ve stabil çözümler elde edebilmek için kaya davranışını anlamak ve yorumlamak gerekmektedir.

Kaya yapısı, doku ve bileşenlerinden kaynaklı çok geniş bir aralıkta değişim göstermektedir. Bu sebepten dolayı kaya davranışını daha iyi anlayabilmek için belirli indeks özelliklerini tanımlamak gerekmektedir. Porozite (n), doğal su içeriği (w), birim hacim ağırlık (γ), boşluk oranı (e), doygunluk derecesi (S_r), permeabilite ve hidrolik iletkenlik, dayanım temel indeks özellikleridir. Bu özellikler alt bölümlerde açıklanmıştır.

2.1.1 Porozite

Kayada ki boşluk hacminin toplam hacme oranı olarak ifade edilen porozite, kaya mukavemetinde önemli bir rol oynar. Kayaların jeolojik oluşum türlerine ve bozuşmalarına bağlı olarak porozite artmakta veya azalmaktadır. Goodman (1989) tarafından yapılan incelemeler sonucunda taneler, kaya kırıntıları ve kavkılarının birikmesi ile oluşan sedimanter kayalarda, porozite sıfıra yakın çok küçük değerler ile 0,9 arasında değişmektedir.

2.1.2 Birim Hacim Ağırlık, Yoğunluk

Ağırlığın toplam hacme oranı birim hacim ağırlık olarak tanımlanmaktadır. Kayalarda birim hacim ağırlık, zeminlere göre daha geniş bir değişim aralığına sahip olmakla birlikte, kayaların gerilme davranışını etkileyen en önemli parametrelerden biridir.

2.1.3 Hidrolik Permeabilite ve İletkenlik

Geçirgen (poroz) malzemelerden sızan sıvının miktarını veya hızını belirlemek için kullanılan malzeme özelliği permeabilite katsayısı veya hidrolik iletkenlik olarak tanımlanır.

Kayalarda permeabilite, fissürlere bağlı olarak gelişmekte ve birçok kaya da Darcy yasasına uymaktadır. Kaya ortamında ki permeabilite çatlak ve eklem takımlarından dolayı, çoğu zaman laboratuvarda ölçülen permeabilite değerinden daha düşük olmaktadır.

2.1.4 Dayanım

Gelen yük karşısında gösterilen direnç olarak tanımlanan dayanım, kaya indeks özellikleri arasında en önemli parametrelerden biridir. Kayalarda dayanımın doğru belirlenebilmesindeki en önemli nokta, numune örneğinin ve deney düzeneğinin arazi şartlarını da göz önünde bulundurarak hazırlanmasıdır.

Kayaların dayanımı arazi ve laboratuvar deneyleri ile belirlenmektedir. Arazi deneyleri dilatometre, presiyometre, plaka yükleme deneyi; laboratuvar deneyleri ise nokta yükleme, tek eksenli basınç dayanımı, fiziksel özellik (yoğunluk, özgül ağırlık, su muhtevası) tayin deneyleridir. Broch ve Franklin (1972), yaptıkları araştırmalar sonucunda kaya dayanımını belirleyebilmek için nokta yükleme deneyini tanımlamışlardır. Nokta yükleme deneyi kaya örneğinin, sertleştirilmiş iki konik uç arasında kırılmasına dayanır. Kırılma, yükleme yönüne paralel olarak gelişen çekme çatlakları boyunca gerçekleşir. Nokta yükleme deneyi sonucunda elde edilen yük dayanım indeksi, I_s , Eşitlik 2.1 ile hesaplanır.

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1’de P, kırılma anındaki yükü; D_e , eşdeğer çap (mm) değerini ifade etmektedir. Akbay ve diğ (2014) tarafından eşdeğer çapın hesaplanması için önerilen denklem Eşitlik 2.2’ de verilmiştir.

$$D_e = 1,128\sqrt{W * D} \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2’de W, numune genişliğini; D, numune çapını ifade etmektedir.

Nokta yük dayanım indeksini tanımlamada ki en önemli araçlardan biri tek eksenli basınç dayanımı değerini belirlemektir. Bunun yanında kayaların malzeme özelliği açısından dayanımlarına göre sınıflandırılmasında, kayaç anizotropisinin saptanmasında, kaya kütle sınıflandırmasında ve tünel açma makinası hızının tahmininde önemli rol oynamaktadır (Topal, 2000).

Broch ve Franklin (1972) kayaların tek eksenli basınç dayanım değerini Eşitlik 2.3 ile hesaplamışlardır.

$$q_u = 24 * I_{S(50)} \quad (2.3)$$

Eşitlik 2.3 de $I_{S(50)}$ 50 mm çapa göre düzeltilmiş nokta yük dayanım indeksini ifade etmekte ve Eşitlik 2.4 ile hesaplanmaktadır.

$$I_{S(50)} = I_S * F \quad (2.4)$$

Eşitlik 2.4 de F düzeltme katsayısı ifade etmektedir ve Eşitlik 2.5 ile hesaplanmaktadır.

$$F = \left(\frac{D_e}{50} \right)^{0,45} \quad (2.5)$$

Düzeltilmiş nokta yük indisi değerini belirlemek, arazi ortamında gerekli mekanik özellikleri tam olarak belirlenemeyen kayalar için önemlidir. Kaya dayanımı hakkında bir ön bilgi elde etmeyi sağlar. Tablo 2.1 de tek eksenli basınç dayanımı ve düzeltilmiş nokta yük indisi değerine göre kaya sınıflaması verilmiştir.

Tablo 2.1 Kaya sınıflama sistemi (Karaman ve Kesimal, 2012)

Kaya sınıfı	UCS (MPa)	$I_{S(50)}$ (MPa)
Çok düşük dayanımlı /dirençli	<6	<1
Düşük dayanımlı /dirençli	6-20	1-2
Orta dayanımlı /dirençli	20-60	2-4
Yüksek dayanımlı /dirençli	60-200	4-8
Çok yüksek dayanımlı /dirençli	>200	>8

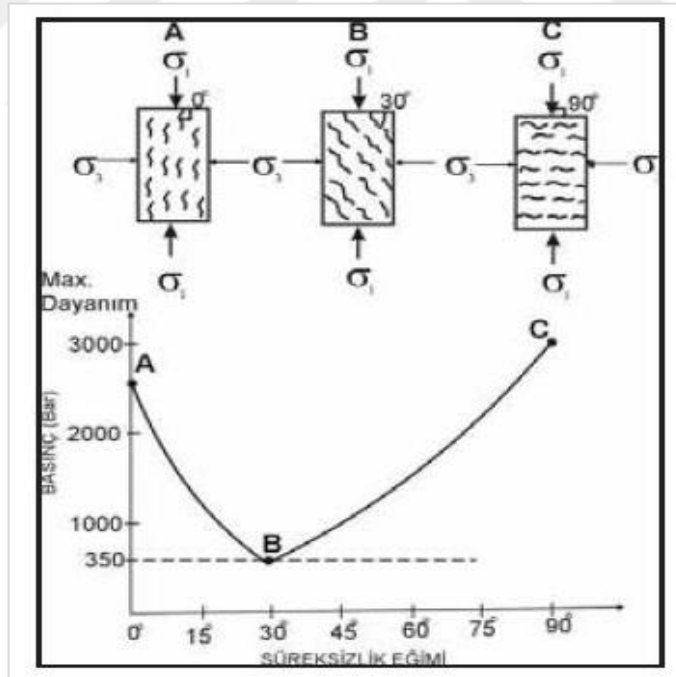
2.2 Kayaçlarda Süreksizlik

Kayaçların mekanik özelliklerini de önemli ölçüde etkileyen süreksizlik, kaya kütlesi içerisinde çekme dayanımı düşük veya sıfır olan düzlemsel, hacimsel yapı bozukluğu olarak tanımlanmaktadır. Kayaçlarda süreksizliklerin belirlenmesindeki amaç jeolojik yapının ortaya konması, kaya kütle sınıflamaları ve sayısal analiz sonuçlarında daha gerçekçi sonuçlar elde etmektir. Dokanak, eklem, fay, fissür, damar ve foliasyon bilinen başlıca süreksizlik türlerindendir.

Kayaçların sınıflandırılmasında da temel ölçüt olarak belirlenen süreksizliklerin, pürüzlülük, dalgalılık, açıklık, sıkılık, bozunma, dolgu ve yönelim gibi temel özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Pürüzlülük, süreksizlik yüzeyinin düzlemsellikten küçük ölçekli sapması; dalgalılık ise süreksizlik yüzeylerinin büyük ölçekli sapması olarak tanımlanmaktadır.

İki süreksizlik arasında ölçülen dik mesafeye süreksizlik aralığı; belirli bir uzunluk boyunca sayılan toplam süreksizlik sayısına ortalama çatlak sıklığı denmektedir.

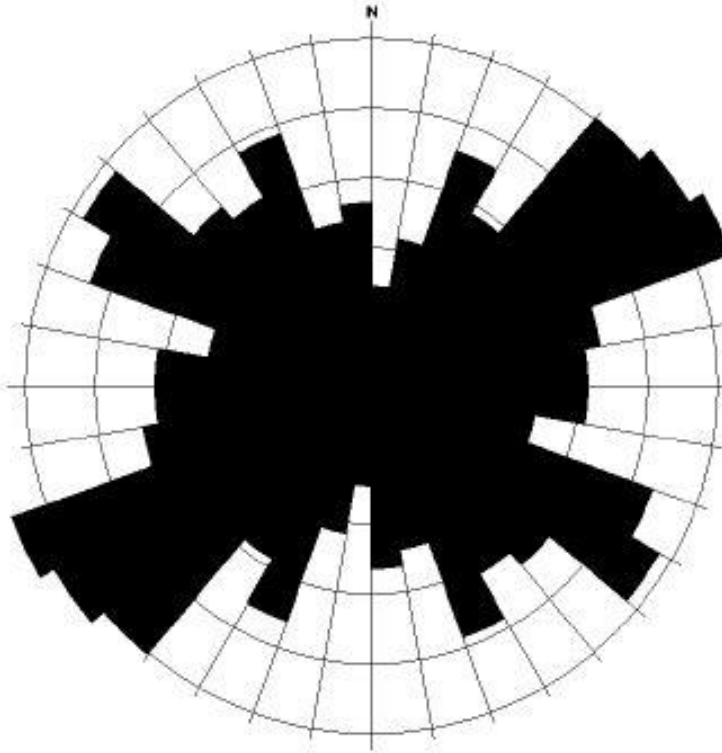


Şekil 2.1 Süreksizlik açısı ve dayanım arasındaki ilişki (Yıldırım ve Gökaşan, 2013)

Süreksizlik yüzeylerinin kimyasal ve fiziksel ayrışma sonucunda ilksel yapısının değişmesi, kayalarda bozuşmaya sebep olur. Meydana gelen bu bozuşma

bölgelerinin ve süreksizlik aralıklarının zayıf malzemeler ile dolması kayanın basınç dayanımının düşmesine sebep olmaktadır. Kayanın basınç dayanımı süreksizliklerin yönelimine bağlı olarak farklı değerler alabilmektedir. Örneğin kaya ortamından alınan numune üzerinde, tek eksenli ve üç eksenli basınç deneyi yapıldığında, süreksizlik yönüne dik yükleme altında maksimum gerilme (C numunesi), eğimli süreksizlikler altında minimum gerilme (B numunesi) değeri elde edilmiştir (Şekil 2.1).

Süreksizliklerin bilinmesi ve belirlenmesindeki bir diğer amaç kaya kütle hareketleri üzerindeki etkisidir. Düşme, devrilme, kayma gibi kütle hareketlerinin meydana gelmesi ortamdaki süreksizliklerin doğrultu, eğim ve sıklık derecelerine bağlı olarak gelişmektedir (Yıldırım ve Gökaşan, 2013). Süreksizlik yönelimleri gül diyagramı ile gösterilmektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Süreksizlik yönelimlerini gösteren örnek gül diyagramı (Sarı ve Çömlekçiler, 2006)

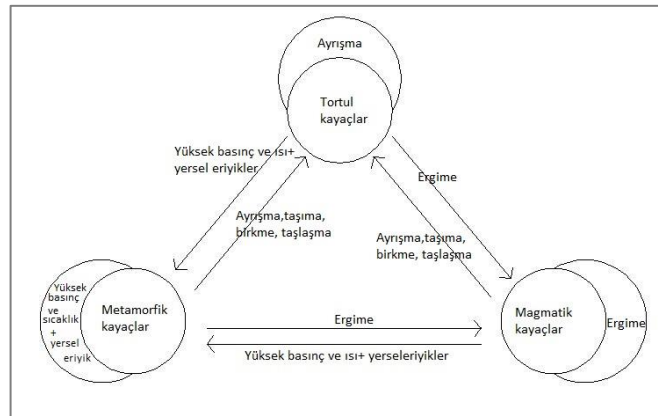
Şekil 2.2 incelendiğinde Kızılkaya ignimbritleri üzerinde yapılan araştırmada süreksizliklerin kuzeybatı- güneydoğu (KB-GD) ve kuzeydoğu-güneybatı (KD-GB) yönlerinde hakim olduğu görülmüştür (Sarı ve Çömlekçiler, 2006).

2.3 Kayaçların Sınıflandırılması

Homojen, sürekli, izotrop, doğrusal ve elastik özelliklerin ideal davranış olarak tanımlanmaktadır. Kayaların yük altında davranışı çoğu zaman ideal olmamaktadır. Çok farklı mineralojik özelliklere sahip kayaların mühendislik özellikleri de farklılık göstermektedir. Mühendislik özellikleri hakkında ön bilgi edinmek, onların üzerinde yapılacak deneysel çalışmaları programlamak, farklı alanlarda çalışan kişilerin iletişimini kolaylaştırmak için kaya sınıflandırma sistemleri geliştirilmiştir. Bu sınıflandırma sistemlerinde kaya oluşumu ve bozulmasına bağlı olarak gelişen eklem takımları, süreksizlikler, dayanım, pürüzlülük, tabakalanma gibi parametreler göz önünde bulundurulmaktadır.

2.3.1 Jeolojik Sınıflandırma

Kayaların oluşum aşamalarını dikkate alan jeolojik sınıflandırmada kayalar; magmatik, metamorfik ve sedimanter olmak üzere üç ana grupta toplanırlar. Manto kökenli kayaç eriyiklerinin katılaşması sonucu magmatik kayalar, magmatik ve metamorfik kayaların su, rüzgar, buzul, dalga gibi herhangi bir dış etkenle taşınıp başka bir yerde çökmesiyle sedimanter (çökelik, tortul) kayalar oluşmaktadır. Metamorfik kayalar ise var olan herhangi bir kaya türünün yüksek sıcaklık ve basınç altında yerin derinliklerinde başkalaşması sonucunda meydana gelirler (Yıldırım ve Gökaşan, 2013). Kaya grupları arasındaki değişimin gösterildiği Şekil 2.3 incelendiğinde her bir kaya grubunun aynı zamanda kendi içerisinde ayrışma, ergime ve basınç ile de farklı türlerine dönüşebileceği görülmektedir.



Şekil 2.3 Kayaç grupları arasındaki dönüşüm (Yıldırım ve Gökaşan, 2013)

2.3.1.1 Magmatik Kayaçlar

Yeryüzü altındaki kayaç malzemesi olan magmanın, yeryüzüne kadar yükselip katılaşp soğumasıyla magmatik kayaçlar oluşur. Oluşan magmatik kayaçlar içerdikleri silisyum miktarına göre asidik veya bazik özellikte olabilirler (Yıldırım ve Gökaşan, 2013).

Magmanın soğuması sonucunda oluşan bu kayaç türleri oluştukları derinliğe bağlı olarak iri kristalli (derinlik kayaçları) ve ince kristalli (yüzey kayaçları) olabilmektedir. Granit, siyanit, gabro iri kristalli derinlik kayaçlarına, bazalt andezit ve riolit ince kristalli yüzey kayaçlarına örnek olarak verilebilir. Bunların dışında dayk ve sill olarak adlandırılan, kaya ortamında süreksizlik olarak tanımlanan kayaç türleride magmatik kayaçlara örnek olarak verilebilir. Sill ve dayklar magmanın yüzeye çıkmadan soğuması sonucunda oluşan damar kayaçlarıdır.

2.3.1.2 Sedimanter (Tortul, Çökelik) Kayaçlar

Yeryüzünde oluşmuş bir kayacın, sıcaklık, kimyasal ve mekanik etkiler sonucunda ufak parçaların, su, rüzgar, dalga, buzul tarafından taşınarak başka bir bölgede çökmesi sonucunda meydana gelen kayaç türüdür. Çökme (sedimentasyon) sonucunda meydana gelen bu kayaçlar tabakalı yapıdadırlar. Bu kayaçlardaki en temel problem tabakalaşma sebebi ile süreksizlik içermeleridir.

Sedimanter kayaçlar oluşum türlerine göre kırıntılı, organik ve kimyasal olmak üzere üç farklı kategoride incelenir. En çok bilinen sedimanter kayaçlar kumtaşı, çakıtaşı, silttaşı, kil taşı ve tüftür. Özellikleri bakımından diğerlerinden biraz daha farklı olan tüfler ülkemizde Erciyes, Hasandağ gibi volkanların püskürttüğü, toz boyutundaki malzemenin soğuk hava etkisi ile yoğunlaşıp, çökmesi sonucu oluşmaktadır (Yıldırım ve Gökaşan, 2013).

Kuru ortamda yüksek dayanımlara sahip olabilen tüfler, su etkisi altında ayrışma ve şişme özellikleri göstermektedir. Doku bakımından yumuşak olmaları nedeniyle kaya ortamında çok çabuk şekil verilebilmekte ve birçok farklı alanda kullanılabilmektedir.

Sedimanter kayaçların diğer bir yaygın türü ignimbritlerdir. Özel bir tüf çeşidi olan ignimbritler, çok yüksek sıcaklıklar sonucunda magmadan çıkan ince lav damlacıkları ve küllerin, geniş bir alanda kaynaklanarak birikmesi sonucunda oluşurlar. Kaynaklanma sırasında üste gelen malzemenin ağırlığı ile yassı bir hal alırlar. İnce laminasyona ve gözenekli yapıya sahip olan kaynaklı tüfler (ignimbrit) ülkemizde Nevşehir bölgesinde yaygın olarak bulunmaktadır. Isı yalıtımı ve süsleme amaçlı kullanılan ignimbritler, yumuşak ve dayanımlı olmaları sebebiyle taş oymacılığında, oyma yapı inşa edilmesinde de tercih edilmektedir (Yıldırım ve Gökaşan, 2013).

2.3.1.3 Metamorfik (Başkalaşım) Kayaçları

Yeryüzünde daha önce var olan her tür kayacın sıcaklık, basınç ve kimyasal etkiler sonucunda mineralojik yapısının değişime uğraması ile oluşan kayaç türleridir. Şist, gnays, mermer ve kuvarsit sık rastlanan metamorfik kayaçlardandır.

Metamorfik kayaçların en temel özelliği şistoziteye (yapraklanma) sahip olmalarıdır. Şistozite, yüksek sıcaklık ve basınç etkisi altında değişik boyutlardaki minerallerin tam paralel veya yarı paralel bir biçimde dizilmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu dizilim herhangi bir dış etken (su, tektonik hareketler) sonucunda metamorfik kayaçların yaprak yaprak ayrılmasına ve bölünmesine neden olmaktadır.

Yukarıda verilen Jeolojik sınıflandırmada kayaç oluşumları göz önünde bulundurulmuştur. Goodman (1989), kayaların sınıflandırılmasında jeolojik oluşumlarından çok, mühendislik açısından davranışlarının daha önemli olduğunu belirtmiş ve Tablo 2.2’de verildiği gibi bir sınıflandırma yapmıştır.

Tablo 2.2 Kaya davranışlarına göre jeolojik sınıflandırma (Goodman, 1989)

Kristalen doku	Örnekler
A. Çözünebilir karbonatlar ve tuzlar	Kireçtaşı, dolomit, mermer, kayatuzu, trona, jips
B. Sürekli bantlardaki mika veya diğer düzlemsel mineraller	Mikaşist, kloritşist, grafitşist
C. Devamlı mika yaprakları içermeyen bantlı silikat mineralleri	Gnays
D. Gelişigüzel yönelimli ve dağınımlı tek düze tane boyuna sahip silikat mineralleri	Granit, diyorit, gabro, siyenit

Tablo 2.2 Kaya davranışlarına göre jeolojik sınıflandırma (devamı)

E. Çok ince taneli ve boşluklu matriks içinde gelişigüzel yönelimli ve dağılımlı silikat mineralleri	Bazalt, riyolit, diğer volkanik kayalar
F. İleri derecede makaslanmış kayalar	Serpantinit, milonit
Kırıntılı (klastik) doku	
A. Duraylı çimentolu	Silis çimentolu kumtaşı ve limonitik kumtaşı
B. Az çözünabilir çimentolu	Kalsit çimentolu kumtaşı ve konglomera
C. Çok çözünabilir çimentolu	Jips çimentolu kumtaşları ve konglomeralar
D. Tamamı çimentolanmamış veya zayıfça çimentolanmış	Ufalanabilir kumtaşları, tuf
E. Çimentolanmamış	Kil bağlayıcılı kumtaşları
Çok ince taneli kayalar	
A. İzotrop sert kayalar	Hornfels, bazı bazalt türleri
B. Makro ölçekte anizotrop fakat mikro ölçekte izotrop sert kayalar	Çimentolu şeyller, tabakalı sert kumtaşları
C. Mikroskopik düzeyde anizotrop sert kayalar	Sleyt, fillit
D. Yumuşak zemin gibi kayalar	Kompaksiyon şeyli, tebeşir, marn
Organik kayalar	
A. Yumuşak kömür	Linyit ve bitümlü kömür
B. Taş kömürü	
C. Petrollü şeyl	
D. Bitümlü şeyl	
E. Petrollü kum	

Tablo 2.2 incelendiğinde kayaların temelde doku yapısına göre sınıflandırıldığı görülmektedir.

2.3.2 Kaya Kalite Göstergesine (RQD) Göre Sınıflandırma

Kaya kalite göstergesi(RQD) kayada var olan süreksizlikleri dikkate alan bir parametredir. Matematiksel olarak kayada yapılan bir sondajda boyu 10 cm ve 10 cm'den daha uzun olan silindirik şeklini koruyabilmiş parçaların toplam uzunluğunun, sondaj ilerleme boyuna oranı olarak tanımlanır. RQD değeri % olarak ifade edilir. RQD değerlerine göre sınıflandırılan kaya kalite göstergesi Tablo 2.3'de gösterilmiştir. RQD değerlerinin hesaplanmasında, sondaj sırasında

veya karotiyerden karotun çıkarılması sırasında meydana gelen yapay kırılmalar dikkate alınmaz (Yıldırım ve Gökaşan, 2013).

Tablo 2.3 Kaya kalite göstergesi (Deere,1989)

Kaya kalite göstergesi	RQD (%)
Çok iyi	100-90
İyi	90-75
Orta	75-50
Zayıf	50-25
Çok zayıf	<25

2.3.3 Kaya Kütle Sınıflama Sistemleri

Ampirik tasarım yaklaşımlarının temel esası olan kaya kütle sınıflama sistemleri günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Temel tasarımı, tünel, yer altı yapıları ve şev gibi birçok alanda kaya kütle sınıflaması yapılmaktadır. Kaya davranışı üzerine yapılan araştırmalar ve incelemeler sonucunda birden fazla sınıflama sistemi geliştirilmiştir. Bu sınıflandırma sistemlerinde kullanılan temel değişkenler; tek eksenli basınç direnci, RQD değeri, süreksizlikler, yer altı suyu ve çevre etkilerdir.

Geliştirilen kaya kütle sınıflama sistemlerinden yaygın olarak kullanılan RMR, Q ve GSI sınıflama sistemleri bu tez kapsamında açıklanmıştır. Bu sınıflama sistemleri jeolojik koşulları dikkate alarak yapılan ölçüm ve değerlendirmeler sonucunda kayada yapılan tasarımlara yardımcı olmaktadır (KOY Yönetmeliği, 2017).

2.3.3.1 Q Kaya Kütle Sınıflama Sistemi

Barton ve diğerleri (1974) tarafından yer altı kazılarında karşılaşılan stabilite sorunlarının değerlendirilmesi sonucunda geliştirilen Q sınıflama sistemi altı farklı parametre değerini göz önünde bulundurmaktadır. Bu parametre değerleri;

J_n : Ekleme takımı sayısı

J_a : Ekleme ayrışma sayısı

J_r : Ekleme pürüzlülük sayısı

J_w : Ekleme suyu azaltma faktörü

SRF: Gerilim azaltma faktörü

RQD: Kaya kalite göstergesi'dir.

Kaya kütle özelliklerine göre belirlenen bu parametre değerleri için gerekli sayısal değerler Tablo 2.4'den alınır. Her bir değişken için tablodan alınan sayısal değerler Eşitlik 2.6'da yerine yerleştirilerek Q değeri hesaplanır.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} \quad (2.6)$$

Tablo 2.4 Q sınıflama sisteminde kullanılan değerler (DLH Yönetmeliği, 2007)

Tanımlama	Değer	Notlar
1. Kaya kalite göstergesi	RQD	
A. Çok zayıf	0-25	1. RQD≤%10 olması durumunda bu değer 10 olarak alınmalıdır. 2. RQD değerinin 100, 95, 90 vb. 5'li aralıkları yeterli doğrultudadır.
B. Zayıf	25-50	
C. Orta	50-75	
D. İyi	75-90	
E. Çok iyi	90-100	
2. Eklem takımı sayısı	J_n	
A. Som, çok az eklem veya hiç yok	0,5-1.0	1. Ara kesitler (kesişen tüneller) için 3.0*J _n kullanılır 2. Tünel girişleri için 2.0*J _n kullanılır.
B. Tek eklem seti	2,0	
C. Tek eklem seti ve dağınık eklemler	3,0	
D. İki eklem seti	4,0	
E. İki eklem seti ve dağınık eklemler	6,0	
F. Üç eklem seti	9,0	
G. Üç eklem seti ve dağınık eklemler	12	
H. Dört veya daha fazla eklem seti, dağınık birden fazla sayıda, küp şekere benzeyen	15	
I. Parçalanmış kaya, toprağa benzeyen	20	
3. Eklem pürüzlülük sayısı	J_r	
a) Süreksizlik kaya dokanağı ve b) 10 cm'lik makaslamadan önceki süreksizlik kaya dokanağı		
A. Sürekli olmayan eklemler	4,0	1. Bu sırada tanımlamalar küçük ve ara ölçekli özellikleri göstermektedir.
B. Pürüze sahip veya düzenli olmayan, dalgalı	3,0	
C. Düz, dalgalı	2,0	
D. Kaygan, dalgalı	1,5	

Tablo 2.4 Q sınıflama sisteminde kullanılan değerler (devamı)

E. Pürüzlü veya düzensiz, düzlemsel	1,5	2. Eğer ilgili eklem setinin ortalama kalınlığı 3 m'den daha fazla ise J_r değerine +1 eklenir.
F. Düz, düzlemsel	1,0	
G. Kaygan, düzlemsel	0,5	
c) Makaslanmış kesimde süreksizlik kaya dokanağı yok		
H. Süreksizlik yüzeylerinin birbirine temasını önleyecek yeterli kalınlıkta kil minerali içeren zon	1	3. Çizgiselliklerin en küçük dayanımı verecek biçimde dağılması şartıyla, çizgisellik bulunduran düzlemsel ve kaygan sürekli olmayan yüzeyler için $J_r=0.5$ alınabilir.
I. Süreksizlik yüzeylerinin birbirine temasını önleyecek yeterli kalınlıkta kumlu, çakıllı yada parçalanmış zon	1	
4. Eklem ayrışma sayısı	J_a	ϕ_r
a) Kaya süreksizlik dokanağı (mineral dokusu yok, sadece yüzey kaplaması)		
A. Yumuşamayan geçirimli olmayan dolgu, sıkı, sert yüzeyler	0,75	
B. Eklem yüzeyinde değişim olmayan, sadece yüzey sıvaması olan	1	25-35
C. Süreksizlik yüzeylerinin değişim oranı çok az, yumuşamayan mineral kaplamaları, kum taneleri, kil içermeyen bozunma olmamış kaya	2	25-30
D. Siltli veya killi kum kaplamaları, çok az ve yumuşamayan kil içeriği	3	20-25
E. Yumuşamayan ve düşük sürtünmeye sahip kil kaplama(kaolin, mika) veya klorit, talk, jips gibi az miktarda şişen killer	4	8-16
b) 10 cm'lik makaslamadan önceki süreksizlik kaya dokanağı (ince mineral dolguları)		
F. Kum taneleri, kil içermeyen bozunma olmayan kaya	4	25-30
G. Aşırı konsolide olan yumuşama olmayan kil minerali dolguları (sürekli fakat kalınlık<5 mm)	6	16-24
H. Orta veya düşük düzeyde aşırı konsolidasyon geçiren, yumuşama olmayan kil minerali dolguları (sürekli fakat kalınlık<5 mm)	8	12-16
J. Şişme potansiyeline sahip kil mineralleri-montmorillonit- (sürekli fakat kalınlık<5 mm)		6-12
c) Kesme durumunda süreksizlik yüzeylerinde temas olmaması (kalın mineral dolguları)		
K, L, M. Bozunmuş veya parçalanmış kaya ve kil bantları ya da zonları (kil koşullarının tanımlanması için bkz. G, H, J)	6-8 veya 8-12	6-24

Tablo 2.4 Q sınıflama sisteminde kullanılan değerler (devamı)

N. Siltli veya kumlu kil bantları veya zonları, çok az kil (yumuşamayan)	5		
O, P, R. Kalın ve sürekli kil bantları veya zonları (kil koşullarının tanımlanması için bkz. G, H, J)	10-13 veya 6-24		
5. Eklem suyu azaltma faktörü	J_w	Yaklaşık Su Basıncı (kgf/cm²)	Notlar
A. Kısmi kazı ve düşük su geliri	1.0	<1	1. C ve F faktörleri kaba tahmindir, drenaj önlemleri uygulanmış ise arttırılabilir. 2. Buz oluşumunun neden olabileceği özel problemler dikkate alınmamıştır.
B. Orta derecede su geliri veya basıncı, yer yer eklem dolgularının yıkanması	0,66	1,0-2,5	
C. Dolgusuz eklemeler içeren sağlam kayada aşırı su geliri veya yüksek basınç	0,50	2,5-10	
D. Aşırı su geliri veya yüksek basınç, eklem dolgularının ileri derecede yıkanması	0,33	2,5-10	
E. Çok ileri derecede su geliri ve patlama sırasında zamanla azalan yüksek su basıncı	0,2-0.1	>10	
F. Zamanla azalmaksızın devam eden son derece fazla su geliri veya su basıncı	0,1-0,05	>10	
6. Gerilme azaltma faktörü	SRF	Notlar	
a) Kaya ortamında tünel açılması durumunda kaya kütlelerinin gevşemesine sebep olabilecek kazı ile kesişen zayıflık zonları			
A. Herhangi bir derinlikte zayıflık zonunun kil veya kimyasal olarak ayrışma geçirmiş kaya parçası içermesi, sıkı olmayan çevre kayacı	10	1. Eğer söz konusu makaslama zonları kazıyı kesmiyor ve sadece etkiliyorsa, SRF değeri %25-50 azaltılabilir.	
B. Küçük eşit 50 m kazı derinliği için kimyasal ayrışma geçiren kaya veya kil bulunduran tek zayıf zon	5,0		
C. 50 metreden büyük kazı derinliği için kimyasal ayrışma geçiren veya kil bulunduran tek zayıf zon	2,5		
D. Kil bulundurmeyen dayanımı yüksek kayada birden fazla makaslama zonu (tüm derinlikler)	7,5		
E. Kil bulundurmeyen dayanımı yüksek kayada birden fazla makaslama zonu (küçük eşit 50 m kazı derinliği için)	5,0		
F. Kil bulundurmeyen dayanımı yüksek kayada birden fazla makaslama zonu (50 metreden büyük kazı derinliği için)			

Tablo 2.4 Q sınıflama sisteminde kullanılan değerler (devamı)

G. Gevşek ve açık eklemler, ileri derecede eklemli küp şeker görünümlü (herhangi bir derinlikte)			
b) Dayanıklı kaya, kaya gerilmesi sorunları	σ_c/σ_t	σ_0/σ_t	SRF
H. Düşük gerilme, yüzeye yakın, açık eklemler	>200	<0.01	25
J. Orta derecede gerilme, uygun gerilme koşulları	200-10	0.01-0.3	1
K. Yüksek gerilme, çok sıkı yapı, genellikle duraylı, yan duvarlar açısından uygun olmayabilir	10-5	0.3-0.4	0.5-2
L. Masif kayada bir saatlik bir süre sonrasında orta derecede dilimlenme	5-3	0.5-0.65	5-50
M. Masif kayada aşırı kaya patlaması ve ani dinamik deformasyon	3-2	0.65-1	50-200
c) Sıkışan kaya: yüksek kaya basıncının etkisi ile düşük dayanımlı kayada plastik akma			
N. Az sıkıştıran kaya basıncı		1-5	5-10
O. Aşırı sıkıştıran kaya basıncı		>5	10-20
d) Şişen kaya: Suyun varlığına bağlı olarak kimyasal şişme etkinliği			
P. Az şişen kaya basıncı			5-10
R. Fazla şişen kaya basıncı			10-15
NOT2. Kuvvetli anizotrop ilksel gerilme alanları (ölçülmüş ise) için; $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$ koşulunda σ_c 0,75 ile >10 olması durumunda 0,5 ile çarpılır. σ_c tek eksenli basınç direncini, σ_c çekme dayanımını, σ_1 ve σ_3 asal gerilmeleri ifade etmektedir.			
NOT3. Tavan yüksekliğinin genişliğinden az olduğu durumlarda SRF değerinin 2,5'ten 5'e arttırılması önerilir.			

2.3.3.2 RMR (Rock Mass Rating) Kaya Kütle Sınıflama Sistemi

Bienawski (1989), tarafından geliştirilen RMR sınıflandırma sistemi kaya kütlelerinin süreksizlik, yer altı suyu, dayanım ve RQD değerlerine bağlı olarak belirlenir. RMR değeri sayısal olarak Tablo 2.5'de kaya kütle özelliklerine göre verilen puan değerleri toplanarak hesaplanmaktadır.

Tablo 2.5 RMR sınıflama sisteminde kullanılan değerler (DLH Yönetmeliği, 2007)

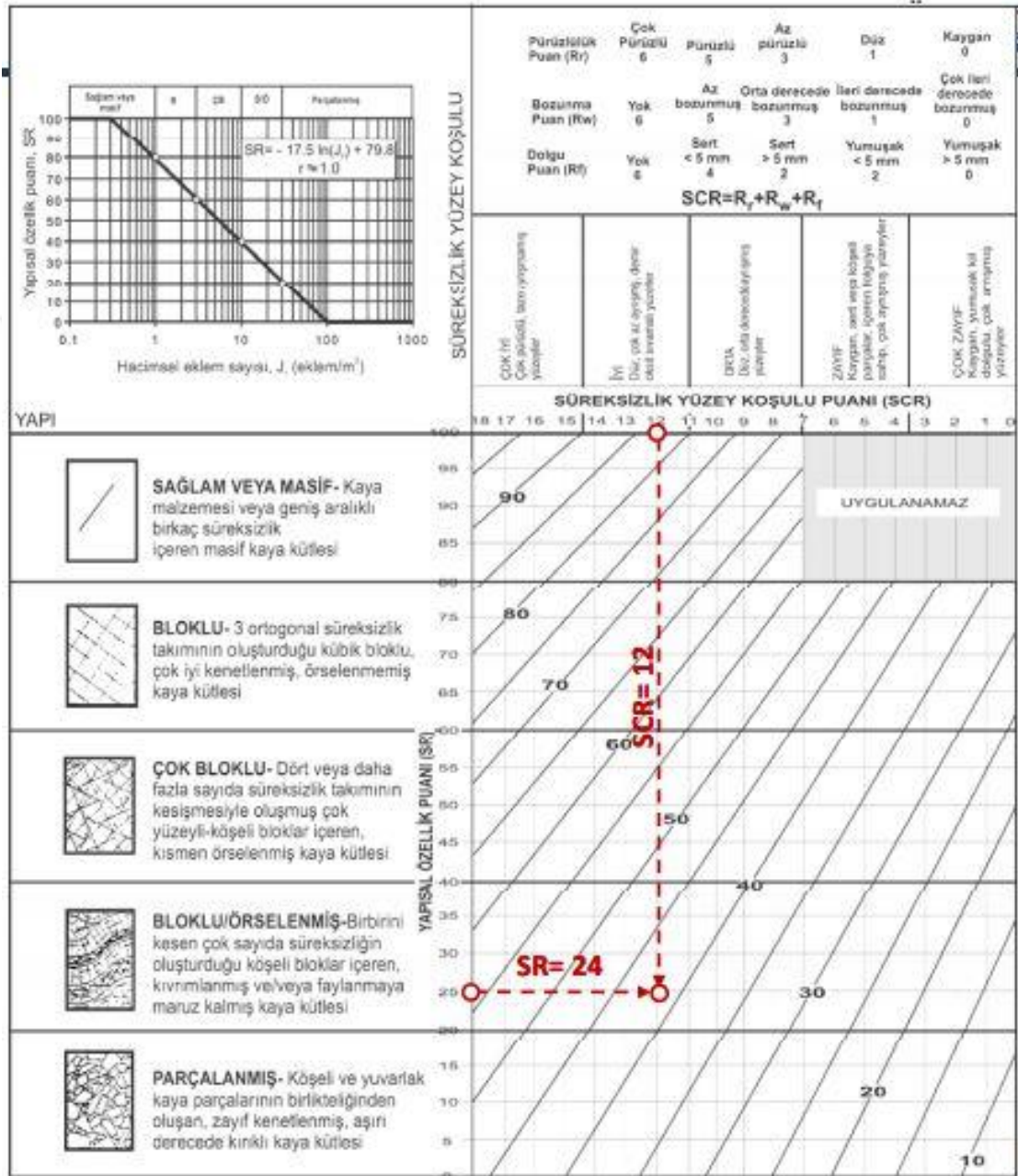
Süreksizlik durumu	Puan
Süreksizlik yüzeyinin çok kaba olması, sürekli ve ayrılma olmayan, eklem yüzeyinin yumuşak olmaması	30

Tablo 2.5 RMR sınıflama sisteminde kullanılan değerler (devamı)

Çok kaba olmayan yüzeyler, ayrılma<1mm, yumuşak olmayan eklem yüzeyi			25
Çok kaba olmayan eklem yüzeyi, ayrılma<1 mm, sert olmayan eklem yüzeyi			20
Sürtünme izli yüzeyler/fay dolgusu, <5 mm, 1-5 mm açık ve sürekli eklemler			10
Yumuşak fay dolgusu, >5 mm kalınlıkta eklemler, >5 mm devamlı süreksizlikler			0
Yer altı suyu			Puan
Tünelin 10m'sinden gelen su (lt/dak)	Eklemdeki su basıncı/maksimum asal gerilme	Genel koşullar	
Yok	0	Tamamen kuru	
10	0-0,1	Nemli	
<25	0,1-0,2	Islak	
25-125	0,2-0,5	Damlama	
>125	>0,5	Su akışı	
Kaya malzemesinin dayanımı			Puan
Nokta yük dayanım indeksi (MPa)	Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)		
>10	>250		
10-4	250-100		
4-2	100-50		
2-1	50-25		
-	25-5		
	5-1		
	<1		
RQD (%)			Puan
100-90			20
90-75			17
75-50			13
50-25			8
<25			3
Süreksizlik aralığı (cm)			Puan
>200			20
200-60			15
60-20			10
20-6			8
<6			5

2.3.3.3 GSI Kaya Kütlesi Sınıflama Sistemi

Kaya kütle özelliklerinin belirlenmesinde günümüzde yaygın olarak kullanılan GSI sistemi ilk defa Hoek tarafından önerilmiştir. Hoek tarafından önerilen GSI sistemi Sönmez ve Ulusay (2002) tarafından geliştirilerek Şekil 2.4’de gösterilmiştir.



Şekil 2.4 GSI sınıflama sistemi (Sönmez ve Ulusoy, 2002)

Şekil 2.4’de verilen tabloya göre kaya ortamının durumunu belirleyebilmek için SCR (süreksizlik yüzey koşulu puanı) ve SR (yapısal özellik puanı) değerlerinin

belirlenmesi gerekmektedir. Süreksizlik yüzey koşulu puanı, SCR, ortamda bulunan süreksizliklerin pürüzlülük, bozunma ve dalga durumlarına göre belirlenmekte ve Eşitlik 2.7 ile hesaplanmaktadır. Yapısal özellik puanı, SR, kaya kütlelerinin çatlaklık durumuna bağlı olarak Eşitlik 2.8 ile hesaplanmaktadır.

$$SCR = R_r + R_w + R_f \quad (2.7)$$

$$SR = -17,5 \ln(J_v) + 79,8 \quad (2.8)$$

Eşitlik 2.7’de R_r pürüzlülük puanını, R_w bozunma puanını, R_f ise dolgu puanını; Eşitlik 2.8’de gösterilen J_v değeri kaya ortamında $1m^3$ alandaki çatlak sayısını ifade etmektedir. Hacimsel çatlak sayısı değerinin hesaplanması için birçok farklı eşitlik bulunmaktadır. Eşitlik 2.9’da J_v değeri çatlaklar arasındaki mesafeye (s) göre belirlenirken, Eşitlik 2.10’da J_v değeri kaya kalite göstergesi (RQD) değerine bağlı olarak belirlenmektedir.

$$J_v = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} + \frac{1}{s_3} + \dots = \sum_{i=1}^n \frac{1}{s_i} \quad (2.9)$$

$$J_v = \frac{110 - RQD}{2.5} \quad (2.10)$$

Eşitlik 2.9’da gösterilen s değeri çatlaklar arasındaki dik mesafeyi, n , çatlak takımı sayısını ifade etmektedir.

Kaya sınıflama sistemleri genel olarak değerlendirildiklerinde RQD değerinin yalnızca kaya sürekliliği ve masifliği hakkında bilgi vermektedir. RMR ve Q sınıflama sistemlerinde ise süreksizlikler değerlendirilmiş ve kazı destek sistemleri önerilmiştir. Tünel ve madencilikte yaygın olarak kullanılan bu sınıflama sistemleri süreksizliklere ek olarak eklem takımı, eklem ayrışması ve yer altı suyu durumlarını da göz önünde bulundurmaktadır. Kaya şev duraylılığı, oyma yapı ve yer altı yapı tasarımı GSI sınıflama sistemi ülkemizde sayısal hesaplarda tercih edilmektedir. GSI sınıflama sistemi kazı ve destek sistemlerinden ziyade kaya ortamının genel yapısı hakkında bilgi vermektedir.

3.1 Giriş

Kaya kütlesinin oyulması ile elde edilen ve bir destekleme yapısına ihtiyaç olmadan kendi kendini taşıma kapasitesine sahip olan yapılara kayadan oyma yapılar denmektedir (KOY Yönetmeliği, 2017). Kayadan oyma yapılar yaşam ve depo amaçlı olmak üzere iki farklı türde inşa edilebilmektedir. Yaşam amaçlı kayadan oyma yapılar konut, otel, müze, ofis gibi yapıları içerirken, depo amaçlı kayadan oyma yapılar yaş sebze ve meyve, tohum depolarını içermektedir.

Jeolojik dayanım indeksi 60 ve üzeri olan tüm kaya tiplerinde inşa edilebilen kayadan oyma yapılar ülkemizde en çok Nevşehir bölgesindeki volkanik kökenli kayalarda inşa edilmektedir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Kayadan oyma bir yapı örneği

Kayadan oyma yapılar statik ve dinamik yükler altında yapısal hasar görmeyecek, ilave bir yapısal sisteme gerek olmadan stabilitesini koruyacak şekilde tasarlanmalıdır. Kayadan oyma yapıların tasarımı kaya kütle etüdü, oyma yapı tasarım ve analizi ile mecburi durumlarda güçlendirme olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmektedir.

3.2 Kaya Kütle Etüdü

Tasarımın ilk aşamasında, jeolojik ve jeofizik incelemeler, sondaj arazi ve laboratuvar çalışmaları yapılmaktadır. Kayadan oyma yapıların inşa edileceği alan ve komşu parsellerdeki mevcut yapılaşmaların tespit edilmesi ile başlayan süreç, bölgeye ait topoğrafik, hidrolojik, jeolojik, jeofizik ve geoteknik özellikler ile ilgili bilgilerin temin edilmesi ile devam eder. Proje sahasında ki kayaç grubu ayrıntılı olarak sondaj çalışmaları ile belirlenir. Bölgede yapılan sondajlar kayadan oyma yapıların inşa edileceği en alt seviyeyi en az 5,0 m geçmelidir. Kayaların yapısal özelliklerini belirlemek için açılan sondajlar yatay düşey ve eğik olarak yapılabilir. Bu amaçla yapılan sondajlarda karotiyer çapı minimum 47.6 mm olmalıdır. Alanda yapılacak sondaj sayısı oyma yapının şeklide göz önünde bulundurularak belirlenir. Oyma yapı izdüşüm alanına göre belirlenen minimum sondaj sayıları Tablo 3.1’de gösterilmiştir (KOY Yönetmeliği, 2017).

Tablo 3.1 Kayadan oyma yapılarda açılacak minimum sondaj sayıları (KOY Yönetmeliği, 2017)

İzdüşüm alanı (A_i) (m^2)	Açılacak sondaj sayısı (en az)
$A_i \leq 2000$	3 Adet
$2000 < A_i \leq 3000$	4 Adet
$3000 < A_i \leq 4000$	5 Adet
$4000 < A_i \leq 5000$	6 Adet
$5000 < A_i \leq 7000$	7 Adet
$7000 < A_i \leq 9000$	8 Adet
$9000 < A_i \leq 12000$	9 Adet
$12000 < A_i \leq 15000^*$	10 Adet
* $A_i > 15000 m^2$ olması durumunda her $3000 m^2$ için +1 sondaj eklenir.	

Geoteknik araştırmalar sonucunda proje sahasındaki kayaç grubu tespit edilerek jeolojik harita çıkartılır. Bu jeolojik harita sahanın jeomorfolojik, jeodinamik, hidrojeolojik, kayaç fiziksel, mekanik özelliklerini içermelidir. Tek bir haritada bu bilgilerin hepsinin verilememesi durumunda birden fazla harita yapılabilmektedir (KOY Yönetmeliği, 2017).

Elde edilen gerekli jeolojik bilgiler sonucunda oyma yapı yapılmasına karar verilmesi durumunda kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için laboratuvar deneyleri yapılmalıdır. Laboratuvar deneyleri sonucunda kayacın su muhtevası, birim hacim ağırlık, boşluk oranı, tek eksenli ve üç eksenli basınç dayanımı gibi model parametre değerleri elde edilir.

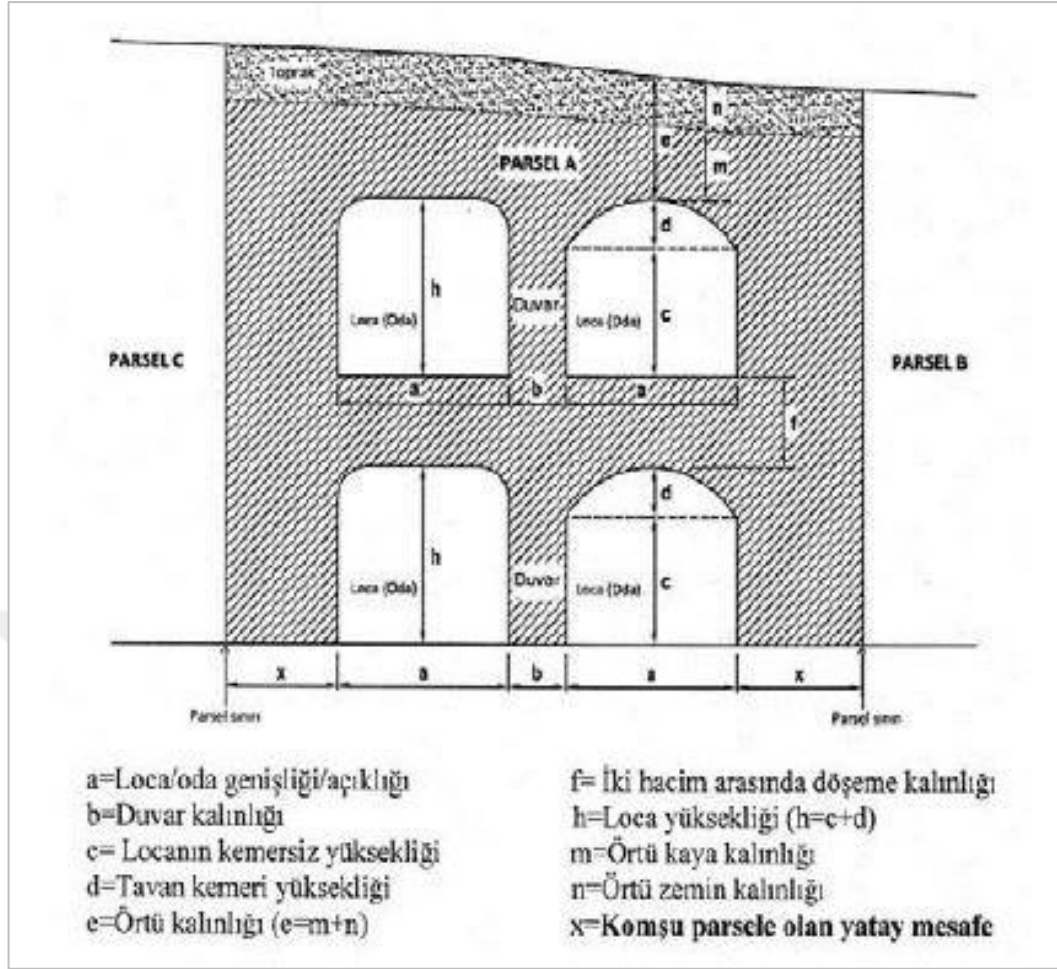
3.2 Oyma Yapı Tasarım ve Analizi

Oyma yapı tasarımının ilk aşaması, kaya kütle etüdü verileri kullanılarak kaya kütle sınıflaması yapılmasıdır. Kaya kütle sınıflaması yapılması için RMR, Q ve GSI sistemleri yaygın olarak tercih edilmektedir. Tasarım kısmında kayadan oyma yapı kat adeti, kat yüksekliği, kemer açıklık ve yükseklikleri, taşıyıcı eleman kesit ve ebatları, yapının kullanım amacına kaya kütle etdne ve statik analiz sonuçlarına bağlı olarak belirlenmektedir. Giriş tüneli, baca ve localardan oluşan kayadan oyma yapılarda, bacalar bölgenin doğal yapısını bozmadan, havalandırmayı sağlayacak şekilde minimum sayıda oluşturulması gerekmektedir.

Çok katlı inşa edilmesi planlanan kayadan oyma yapılarda düşey taşıyıcı elemanlar planda st üste gelecek şekilde tasarlanır ve önce st kat kazısı yapılır. rnek bir çok katlı kayadan oyma yapı şekil 3.2’de gösterilmiştir.

Kayadan oyma yapı analizleri için gerekli olan örtü kalınlığı, oyma yapılar arasındaki mesafe, duvar kalınlığı, kolon boyutları gibi statik parametrelerin minimum değerleri oyma yapı kullanım amacına göre farklılık göstermektedir.

Bu çalışmada depo amaçlı kayadan oyma yapılar incelendiğinden, yalnızca depo amaçlı kayadan oyma yapıların yapısal tasarım esaslarına değinilmiştir. Yapısal tasarım kısmı hakkında gerekli tüm bilgiler 2017 Kayadan Oyma Yapılar Yönetmeliğinde ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil 3.2 Çok katlı kayadan oyma yapı (KOY Yönetmeliği, 2017)

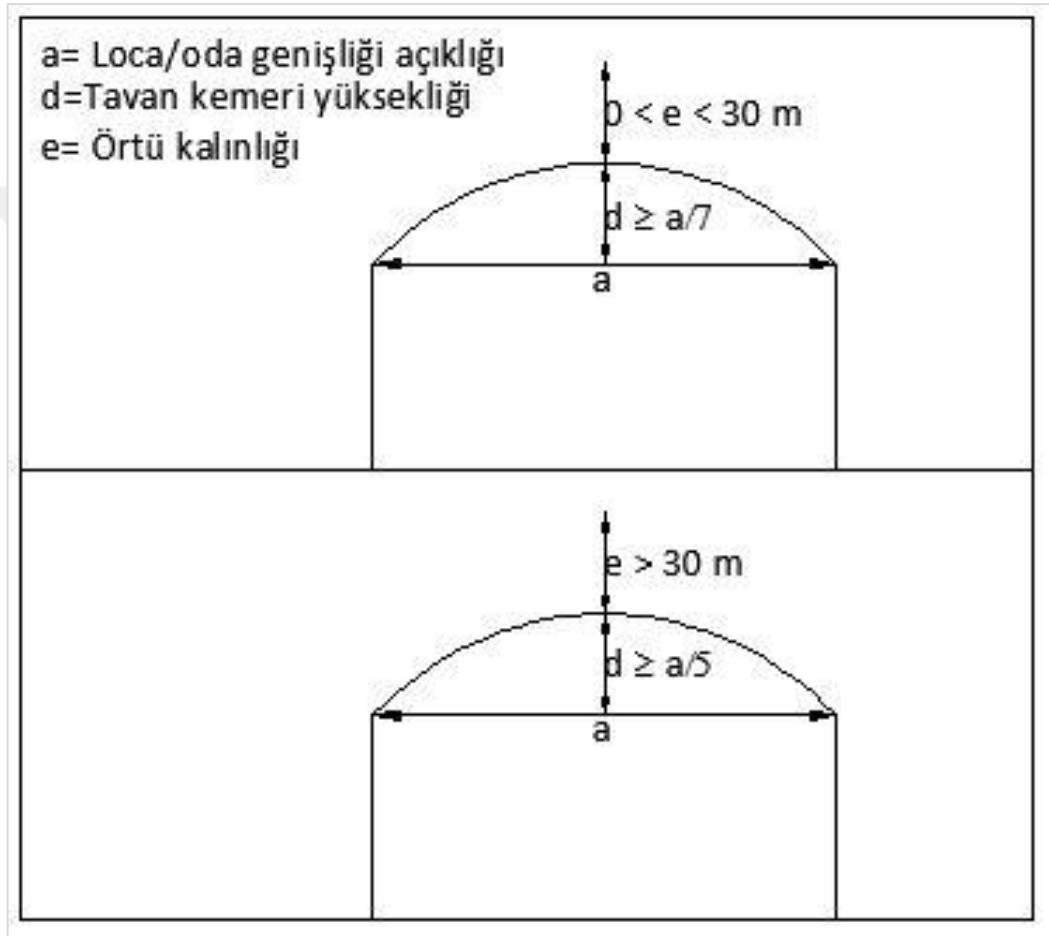
3.2.1 Depo Amaçlı Kayadan Oyma Yapıların Tasarım Esasları

Kayadan oyma yapı tasarımında temel amaç izin verilebilir yer değiştirme sınırları içerisinde kaya dayanımının aşılmamasıdır. Bu amaç doğrultusunda oyma yapılarda stabiliteyi sağlamak için yönetmelikte önerilen tasarım şartlarına uyulması gerekir. Bu tasarım şartları, örtü kalınlığı, duvar kalınlığı, kemer yüksekliği ve kaya kütle parametre katsayılarını içermektedir. Depo amaçlı kayadan oyma yapılar için bu durumlar aşağıda açıklanmıştır.

Depo amaçlı kayadan oyma yapılarda minimum örtü kalınlığı, oyma yapı açıklığının yarısından fazla olmalı ve/veya oyma yapı tavanında oluşacak normal gerilmelerin yan duvarlara aktarılmasını sağlayacak şekilde olmalıdır. Zayıf kayalarda ise minimum örtü kalınlığı beş metre olmalı ve yüzeyden yüz metre daha derine oyma yapı yapılmaması önerilmektedir.

Depo amaçlı kayadan oyma yapı şeklinde tavanda köşeli boşluklardan kaçınılmalı veya kemer şeklinde inşa edilmelidir. Minimum kemer yüksekliği, örtü kalınlığı ve açıklığa bağlı olarak Şekil 3.3’de gösterilmiştir.

KOY, 2017’ye göre Şekil 3.3’de görüldüğü gibi örtü kalınlığının otuz metreden az olması durumunda kemer yüksekliği, açıklığın yedide birinden, örtü kalınlığının otuz metreden büyük olması durumunda kemer yüksekliği, açıklığın beşte birinden küçük olamaz.



Şekil 3.3 Depo amaçlı kayadan oyma yapı minimum kemer yüksekliği (KOY Yönetmeliği, 2017)

Tasarım için belirlenmesi gereken localar arasındaki minimum duvar kalınlıkları Tablo 3.2’de gösterilmiştir. Tablo 3.2 incelediğinde duvar kalınlıkları; örtü kalınlığı, kaya kalitesi, oyma yapı yükseklik ve genişliğine bağlı olarak belirlenmektedir. Bunlara ek olarak süreksizliklerin yönelimi de oyma yapı duvar kalınlığını etkilemektedir.

Tablo 3.2 Depo amaçlı kayadan oyma yapı minimum duvar kalınlıkları (KOY Yönetmeliği, 2017)

Toplam örtü kalınlığı (m)	Kayaç sınıfı		
	Zayıf	Orta	Sağlam
0-50	$\frac{2h}{5} < b < \frac{h}{2}$	$\frac{h}{7} < b < \frac{h}{6}$	$\frac{h}{8} < b < \frac{h}{7}$
50-100	$b > h$	$\frac{2h}{5} < b < \frac{h}{2}$	$\frac{h}{7} < b < \frac{h}{6}$
100-150	-	$\frac{2h}{3} < b < h$ veya $\frac{2a}{3} < b < a$	$\frac{2h}{5} < b < \frac{h}{2}$ veya $\frac{2a}{5} < b < \frac{a}{2}$
150-200		$b > h$ veya $b > a$	$b > \frac{h}{2}$ veya $b > \frac{a}{2}$

Oyma yapılar için taşıyıcı sistem gerekmesi durumunda, yapılan sayısal analizlerde kaya kütle özelliklerine ait parametre değerleri kullanılmalıdır. Kaya kütle özelliği değerleri, laboratuvar ortamında elde edilen tek eksenli basınç ve çekme dayanımları, Elastisite modülü, kohezyon, içsel sürtünme açısı, Poisson oranı ve diğer malzeme parametre değerlerinin Tablo 3.3’de verilen katsayılar ile çarpılması sonucunda elde edilir.

Tablo 3.3 Taşıyıcı sistem olması durumunda kaya kütle özelliklerinin elde edilmesinde kullanılacak katsayılar (KOY Yönetmeliği, 2017)

Kayaç grubu	GSI				
	60	70	80	90	100
Magmatik kayaç	0.3	0.4	0.5	0.75	1.0
Metamorfik kayaç	0.2	0.3	0.4	0.6	0.9
Sedimanter kayaç	0.3	0.4	0.5	0.6	0.9

Tablo 3.3’e bakıldığında kaya kütle özelliklerine dönüşüm için kullanılan katsayının kayaç türüne ve ortamın jeolojik dayanım indeksi değerine bağlı olduğu görülmektedir.

3.3 Güçlendirme

Kayadan oyma yapılarında temel tasarım yaklaşımı, açıldıktan sonra herhangi bir desteğe gerek kalmadan kendi kendini tutabilmesinin sağlanmasıdır. Fakat bazı durumlarda önceden öngörülemeyen veya zamanla meydana gelen hasarlar, oyma yapıyı destekleme ve/veya güçlendirme gerektirmektedir. Oyma yapılarda yapılan destekleme veya güçlendirmeler, alanın doğal görünümünü ve özelliklerini bozmayacak şekilde olmalıdır.

Mevcut var olan soruna göre kaya saplaması, püskürtme beton, mevcut kayadan kesilerek elde edilen bloklar, desteklemede ise ahşap ve çelik esaslı çerçeve yöntemleri tercih edilmektedir. Kaya saplamaları genelde süreksizlik içeren bölgeleri güçlendirmek için, ahşap ve çelik çerçeveler tavan ve kotlar arasındaki döşeme taşıma gücünü arttırmak için, püskürtme beton ve sargı ise kolon ve duvarların taşıma gücünü arttırmak için kullanılır (KOY Yönetmeliği, 2017).

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE KAYA MALZEMESİ İÇİN BÜNYE MODELLERİ

4.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Günümüzde karşılaşılan geoteknik problemlerin birçoğu karmaşık mühendislik problemlerini oluşturmaktadır. Bu karmaşık problemleri çözmek ve gerçeğe yakın sonuçlar elde etmek için kapalı çözümler, sayısal yöntemler gibi birden çok metot geliştirilmiştir. Kolay uygulanabilirliği, hızlı çözüm yapabilme ve gerçeğe yakın sonuçlar vermesinden dolayı sayısal çözümler, tüm mühendislik problemlerinde en yaygın kullanılan metotlardan biridir.

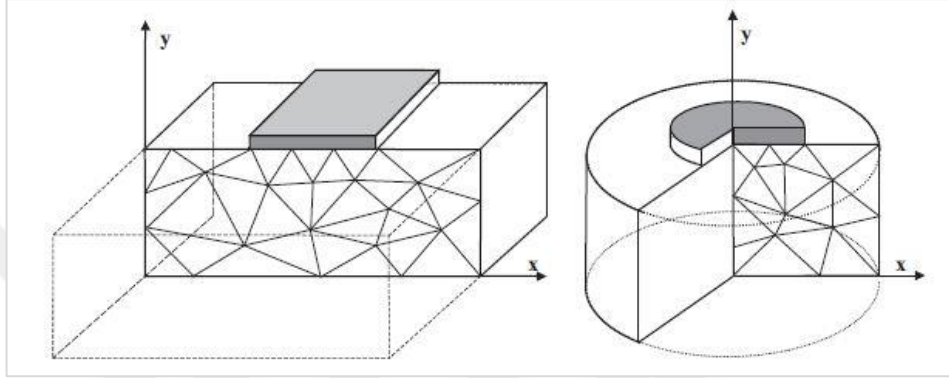
Bilgisayar teknoloji gelişiminin hızlanması ile sayısal yöntemler de gelişmiş; sonlu farklar, sonlu elemanlar, ayırık elemanlar, sınır elemanlar gibi yöntemler oluşturulmuştur. Plaxis, Abaqus gibi geoteknik mühendisliğinde oldukça sık kullanılan paket programlar sonlu elemanlar yöntemini temel alarak analiz yapmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi, matematiksel ifadeler ile tanımlanan sürekli sistemlerin genel çözüm yöntemidir (Şengün, 2013). Bu yöntemle ele alınan model birbirlerine düğüm noktaları ile bağlı küçük elemanlara (mesh) bölünür. Her bir eleman için yazılan diferansiyel denklemler entegre edilerek sistem denklemleri elde edilir. Sistem denklemleri düğüm noktalarındaki bilinmeyen değerler için çözülür.

Geoteknik mühendisliğinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözümleme yapabilmek için problemi doğru tanımlamak önem arz etmektedir. Çözümler problem doğasına bağlı olarak 2 veya 3 boyutlu modellenenmektedir. İncelenen problem düzlem şekil değiştirme veya eksenel simetrik (aksisimetrik) olarak ele alınabiliyorsa 3 boyutlu analiz yapmaya ihtiyaç duyulmamaktadır.

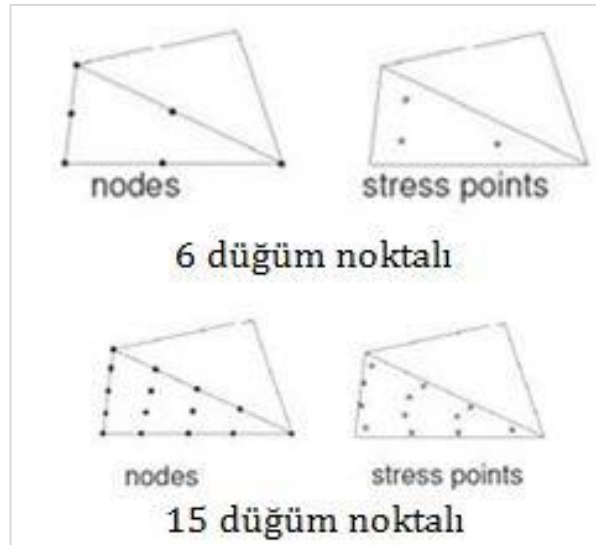
Düzlem şekil değiştirme durumunda problemin z doğrultusunda herhangi bir şekil değiştirmenin oluşmadığı kabul edilir. Bu durumda şekil değiştirmeler sadece x ve

y doğrultularında hesaplanır. Eksenel simetri (aksisimetri) durumunda ise hem yapı hem de yük düşey merkez etrafında simetrik özellik gösterir. Bu durumda çevresel şekil değiştirmeler göz ardı edilir ve problem düşey radyal düzlemde iki boyuta indirgenir (Şekil 4.1). Eksenel simetri durumunda dikkat edilmesi gereken en önemli husus hem yapı hem de yükleme durumunun dairesel olmasıdır. Bu durumlardan birinin dairesel olmaması sonucunda problem iki boyuta indirgenemeyeceğinden, üç boyutlu olarak ele alınmalıdır (Şengün, 2013).



Şekil 4.1 Düzlem ve eksenel şekil değiştirme durumu (Plaxis manual, 2019)

Sonlu elemanlar analizinde önemli olan bir diğer durum oluşturulan elemanlardır (Şekil 4.2). Oluşturulan elemanlarda düğüm noktalarının sayısının artması modelin daha küçük parçalara ayrılmasını sağlamakta ve sonuç doğruluğunu arttırmaktadır.



Şekil 4.2 Sonlu elemanlar düğüm noktaları (Plaxis manual, 2019)

4.2 Kaya Malzemesi için Bünye Modelleri

Kayanın oyulması ile ortaya çıkan yapı mekanik olarak bir yük boşaltılması durumu olup bunun sonucunda jeolojik ortamda şekil değiştirmeler meydana gelmekte ve gerilme değişimleri oluşmaktadır. Kayanın oyulması sonucunda yapılan yük kaldırma işlemi ortamda çekme gerilmeleri ve kayma gerilmelerinde artışa neden olur. Bu artışların mertebesi başlangıçta plastik şekil değiştirmelere yol açarken daha yüksek mertebelerde jeolojik ortamın çökmesi ve/veya göçmesine neden olur. Güvenli bir yer altı yapısı kazısı yapabilmek için kazı dolayısı ile jeolojik ortamda değişen gerilmeler ile ortaya çıkan şekil değiştirmelerin önceden belirlenerek bir destekleme sistemi tasarımı yapılması yoluna gidilmektedir.

Kaya oyma yapılar içinde bu mühendislik yaklaşımına göre ortamda kazı dolayısı ile meydana gelen yük boşaltma işleminin neden olduğu gerilme ve şekil değiştirmelerin gerçekçi olarak belirlenmesi gerekmektedir. Kaya oyma yapısının boyutları ve açıldığı ortamın mekanik özelliklerine bağlı olarak ortamda oluşacak plastik şekil değiştirmelerin ve buna karşılık normal ve kayma gerilmelerinin belirlenmesi için elasto-plastik analizlerin yapılmasına ihtiyaç vardır.

Bu bölümde kaya oyma yapıların davranışını belirlemek için kullanılan lineer elastik model, plastik davranışını belirleyebilmek için İdeal Plastik ve Hoek-Brown bünye modellerine değinilmiştir.

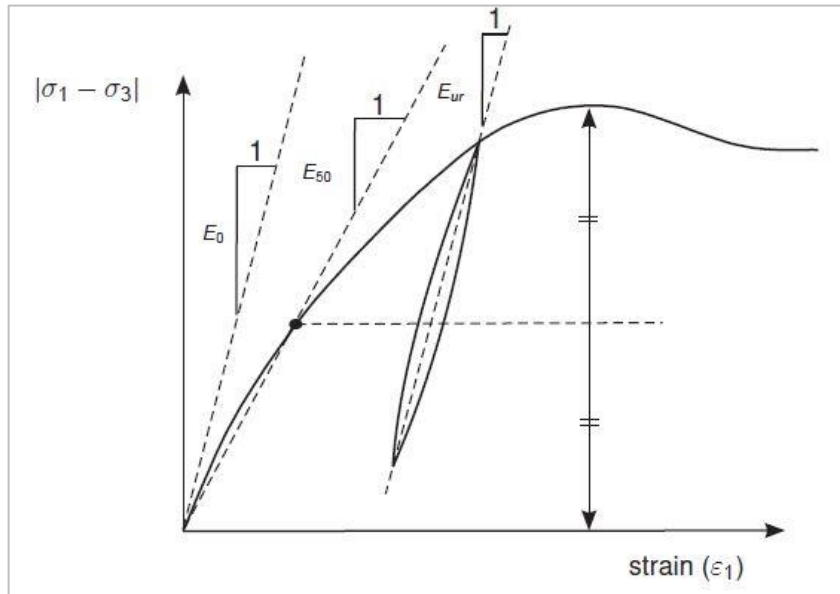
4.2.1 Lineer Elastik Bünye Modeli

Malzemelerin elastik davranış göstermesi ve yük altında meydana gelen şekil değiştirmelerin doğrusal durumunda sayısal analizlerde lineer elastik bünye modeli kullanılmaktadır. Lineer Elastik bünye modelinde malzemenin Hooke yasasına göre davranış gösterdiği ve izotrop olduğu kabul edilir. Bu çalışmada kullanılan sonlu elemanlar programında analiz yapabilmek için rijitlik parametreleri olan Elastisite modülü ve Poisson oranı değerlerini tanımlamak yeterlidir. Yaygın olarak çalışmalarda Lineer Elastik bünye modelinin tercih edilmesinin sebebi hesaplanan gerilme ve yer değiştirmelerin mertebesi ile bu değerlerin, plastik davranış durumu ile mukayese edilebilmesidir.

4.2.2 İdeal Plastik Bünye Modeli

Mohr-Coulomb akma kriterini göz önünde bulunduran bu bünye modelinde malzemenin elasto-plastik davranış gösterdiği ve izotrop olduğu kabul edilir. Zemin ve kaya ortamını modellemede tam olarak yeterli olmayan bu model deformasyonlarla ilgili ilk tahminlerin yapılmasında, hesap süresi kısalığından dolayı tercih edilmektedir. Bu bünye modeli kullanılarak yapılan sayısal analizlerde ortam elastisitesi için Elastisite modülü ve Poisson oranı tanımlanmaktadır. Zeminin plastisitesini tanımlamak için de dilatasyon açısı ve zeminin kayma mukavemeti parametreleri olan kohezyon, içsel sürtünme açısı değerlerini tanımlamak gerekmektedir.

İdeal Plastik bünye modelinde üç farklı rijitlik tanımlanmaktadır. Bu rijitlik değerleri başlangıç elastisite modülü (E_0), sekant modül (E_{50}) ve boşaltma-tekrar yükleme (E_{ur}) modülüdür (Şekil 4.3). Başlangıç elastisite modülü, üç eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen gerilme diyagramının başlangıç eğimi ifade etmektedir. Sekant modülü ise ortamda göçme olmasına sebep olabilecek gerilme değerinin yarısı ile başlangıç gerilme değerinin birleşmesi sonucu oluşan eğri eğimini ifade etmektedir. Bu modül genellikle zemin yükleme durumlarında tercih edilmektedir. Yükleme boşaltma modülü ise tünel ve yer altı yapılarında kullanılan, boşaltma ve tekrar yükleme eğrisinin eğimi olarak tanımlanmaktadır.

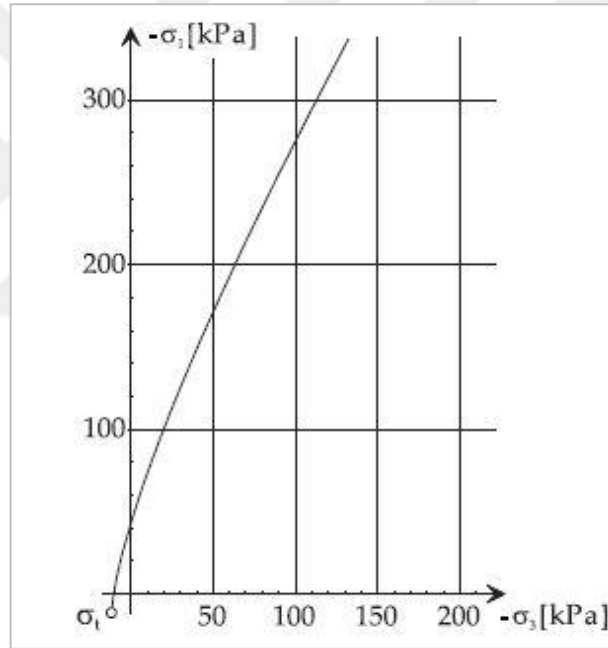


Şekil 4.3 Üç eksenli deney sonucu rijitlik modülleri (Plaxis manual, 2019)

4.2.3 Hoek-Brown Bünye Modeli

Kayalar eklem, fay, çatlak gibi içerdikleri süreksizlikler sebebiyle zeminlerden farklı davranış sergilemektedirler. Hoek ve Brown tarafından som yapıda olmayan, eklemlili kaya kütleleri üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bu bünye modeli; kayaların yenilme ölçütü olarak tanımlanmakta ve kaya kütle özelliklerini dikkate almaktadır.

Ortamın GSI değeri ile ilişkilendirilen Hoek-Brown göçme ölçütü yüksek oranda süreksizlik içeren kayalarda, dayanım ve deformasyonların hesaplanmasında kullanılmaktadır (Hoek ve Brown, 2018). En büyük ve en küçük asal gerilmeler tarafından ifade edilen bu yenilme ölçütünde dayanım sınır durumu, Eşitlik 4.1 ile hesaplanmaktadır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Hoek-Brown yenilme ölçütü (Plaxis manual, 2019)

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left[m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right]^a \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.1’de verilen σ_1 , σ_3 en büyük ve en küçük asal gerilme değerlerini; σ_{ci} ise tek eksenli basınç dayanım değerini ifade etmektedir. Eşitlikte m_b , s ve a kaya kütle sabitleri olup, m_b kaya süreksizlik içeriğine bağlı kaya katsayısını; s ve a malzeme

sabitlerini ifade etmektedir. Malzeme sabitleri s ve a Eşitlik 4.2 ve Eşitlik 4.3 ile hesaplanmaktadır.

$$s = \exp\left[\frac{(GSI - 100)}{(9 - 3D)}\right] \quad (4.2)$$

$$a = 1/2 + 1/6\left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}\right) \quad (4.3)$$

Eşitliklerde GSI , ortamın jeolojik dayanım indeksini, D örselenme faktörünü ifade etmektedir. Örselenme faktörü kayada yapılacak işleme bağlı olarak ortamdaki tahribatı göz önünde bulunduran katsayısıdır ve değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir.

Kaya süreksizlik içeriğine bağlı m_b katsayısı Eşitlik 4.4 ile hesaplanmaktadır. Eşitlik 4.4'de verilen m_i değeri som kaya parametre katsayısını ifade etmektedir.

$$m_b = m_i \exp\left[\frac{(GSI - 100)}{(28 - 14D)}\right] \quad (4.4)$$

Som kaya parametresi m_i değeri kayaç türüne göre farklı değerler alabilmektedir. Ayrışmaya dirençli kayalarda yüksek değerler alırken, herhangi bir dış etki sonucunda kolay ayrışabilecek kayalarda daha düşük değerler almaktadır.

5

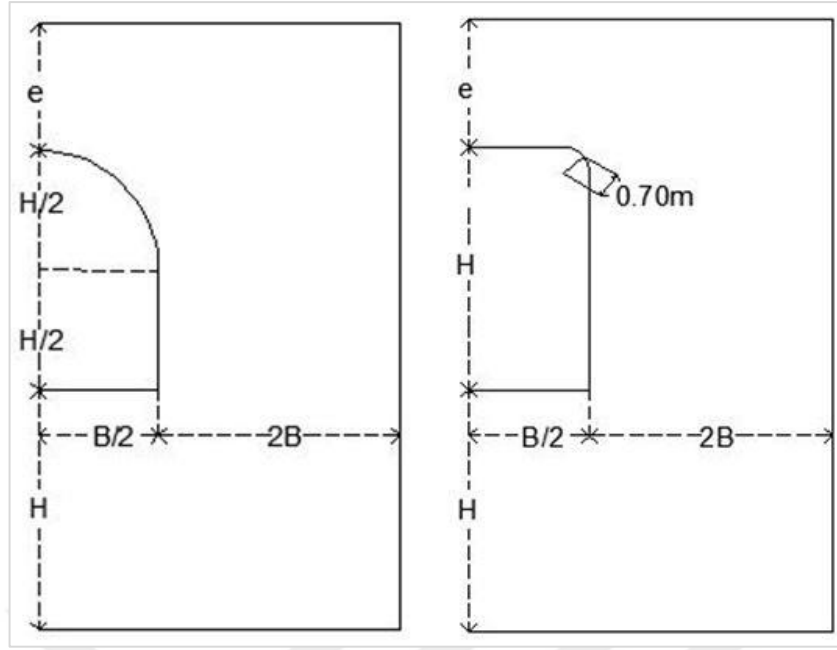
SAYISAL ANALİZLER

Bu tezde depo tipi kaya oyma yapıların davranışını belirlemek amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda Nevşehir Kapadokya bölgesinde volkanik tüflerde inşa edilen depo tipi kemer ve düzlem tavanlı kaya oyma yapılar için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerde Kayadan Oyma Yapılar Yönetmeliği 2017’de önerilen boyutlar ve sahada yerinde yapılan gözlemlere dayanan bir yapı modellenmiştir. Sayısal modelde göz önüne alınan kayanın malzeme özellikleri Nevşehir’in Kapadokya Bölgesi’nde yer alan tuf kayaç için literatür taraması ile belirlenmiştir. Sayısal analizler için sonlu elemanlar yöntemi benimsenerek kaya davranışını da modelleyebilen Plaxis 2D yazılımı kullanılmıştır.

5.1 Kaya Oyma Yapılarda Sayısal Modelleme

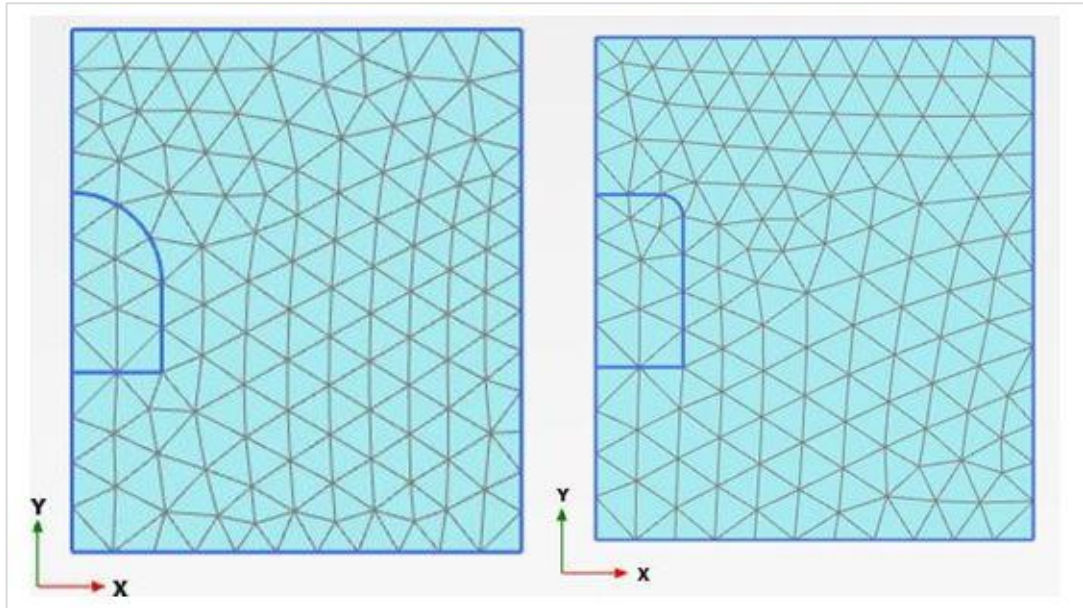
Kayadan oyma yapıların boyut ve şekilleri bölgede var olan jeolojik birimlere, inşa alanına uygun makine boyutlarına ve kaya süreksizlik içeriği gibi birçok etkene bağlıdır. Nevşehir bölgesi için kaya oyma yapı boyutları bölgeden bölgeye farklılık göstermekle birlikte 3,5 m ile 8,0 m arasında değişmektedir. Kemer veya düzlem tavanlı olarak inşa edilebilen kaya oyma yapılar için çoğunlukla Şekil 5.1’de gösterilen en kesitler kullanılmaktadır. Şekil 5.1’de gösterildiği gibi H, kayadan oyma yapı yüksekliğini; B, kayadan oyma yapı genişliğini; e, örtü yüksekliğini ifade etmektedir. Kaya oyma yapı tavanının düzlem olması durumunda kullanılan makinenin özelliğine göre köşeler pahtlı olarak açılmaktadır.

Sayısal modellerde, proje kapsamında inceleme yapılan Bahçeli-Kavak Bölgesi’nde yer alan kaya oyma yapıların geometrisine sadık kalınarak, yükseklik (H) ve genişlik (B) değerleri 5,5 m ve örtü kalınlığı (e) değeri 5,0 m, 15,0 m ve 30,0 m olarak dikkate alınmıştır. Ortamın jeolojik dayanım indeksi (GSI), minimum değer olan 60 olarak kabul edilmiştir.



Şekil 5.1 Kaya oyma yapı en kesitleri

Gerilme şekil değiştirme analizlerinde daha gerçekçi sonuçlara ulaşmak için 15 düğüm noktalı üçgen sonlu elemanlar kullanılması tercih edilmiştir. Modelleme kolaylığı ve hesap hızı düşünülerek sayısal analizlerde simetriden yararlanılmış, sayısal modelin yarısı dikkate alınmıştır. Buna göre kemerli ve düzlem tavanlı kaya oyma yapılarının sayısal analizleri için Şekil 5.2’de verilen sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur. Analizlerde yer altı suyunun olmadığı kabul edilmiştir.



Şekil 5.2 Kaya oyma yapı için oluşturulan sonlu elemanlar ağı

Sayısal analizlerde ilk olarak kaya oyma işleminin yapılmadığı başlangıç durumu için gerilmeler belirlendikten sonra yapılan kazı işlemi tek aşamada gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan modellerde kayanın gerilme şekil değiştirme davranışının elastik ve plastik davranış göstermesi durumları dikkate alınmıştır. Elastik davranışı modellemek için Lineer Elastik bünye modeli, plastik davranışı modellemek için ise İdeal Plastik bünye modeli (Mohr-Coulomb) ile Hoek-Brown bünye modeli dikkate alınmıştır. Analizlerde kullanılan parametre değerleri Kavak Tüfö için literatür taraması sonucunda elde edilmiş ve Tablo 5.1’de verilmiştir (Ulusay ve Aydan, 2018).

Tablo 5.1 Sayısal analizlerde kullanılan malzeme parametre değerleri

Katsayı	Sembol	Birim	LE	İP	HB
Kuru birim hacim ağırlık	γ	kN/m ³	14	14	14
Doygun birim hacim ağırlık	γ_{sat}	kN/m ³	20	20	20
Elastisite modülü	E	MPa	700	700	700
Poisson oranı	ν	-	0,25	0,25	0,25
Kohezyon	c	MPa	-	1,0	-
İçsel sürtünme açısı	ϕ	°	-	26	-
Çekme gerilmesi	σ_T	MPa	-	0,5	-
Dilatasyon açısı	ψ	°	-	0	0
Tek eksenli basınç dayanımı	σ_{ci}	MPa	-	-	5
Örselenme faktörü	D	-	-	-	0
Som kaya katsayısı	m_i	-	-	-	13
Jeolojik dayanım indeksi	GSI	-	-	-	60

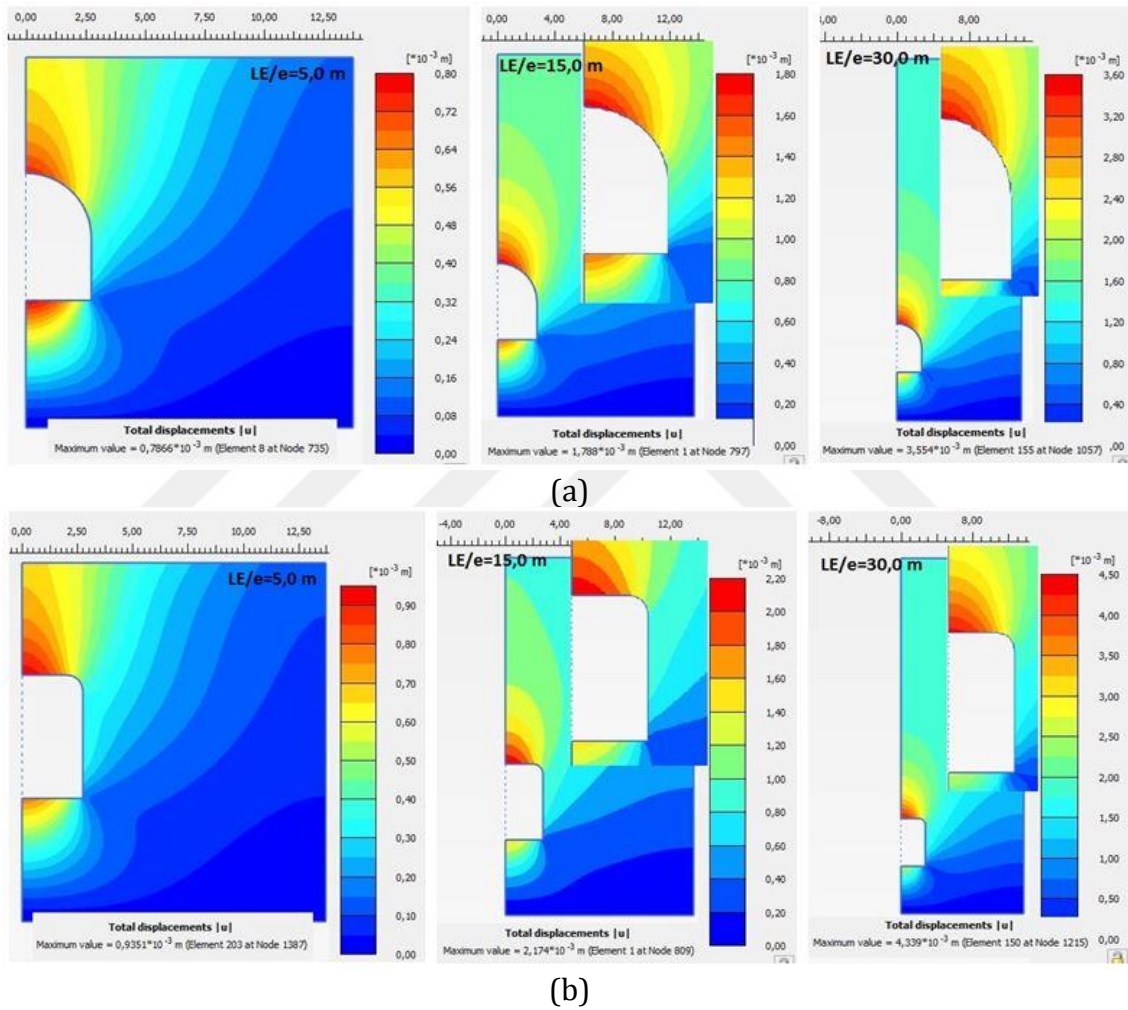
Tablo 5.1’de verilen değerler kullanılarak her iki oyma yapı tipi içinde analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde yer değiştirme, kayma şekil değiştirmesi, toplam asal gerilme ve toplam şekil değiştirme durumları incelenmiştir. Elde edilen analiz sonuçları örtü kalınlığı ve bünye modellerine göre alt bölümlerde verilmiştir.

5.2 Örtü Kalınlığına göre Sayısal Analizler

Farklı örtü kalınlıkları ile gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda elde edilen yer değiştirme, kayma şekil değiştirmesi, asal gerilme ve asal şekil değiştirme dağılımları incelenen bünye modelleri için ayrı ayrı verilmiştir.

5.2.1 Lineer Elastik Bünye Modeli Analiz Sonuçları

Kayadan oyma yapıların her iki türü için lineer elastik bünye modeli sonucunda elde edilen toplam yer değiştirme dağılımları Şekil 5.3'de, sayısal değerler Tablo 5.2'de gösterilmiştir. Şekil 5.3 incelendiğinde en büyük yer değiştirmelerin oyma yapı taç kısmında meydana geldiği görülmektedir. Bu durum kabul edilen analiz şartları için gelen yükün büyük bir kısmının bu bölgede taşındığını ve bu bölgenin olası göçme bölgesi olduğu sonucunu ortaya çıkartmaktadır.

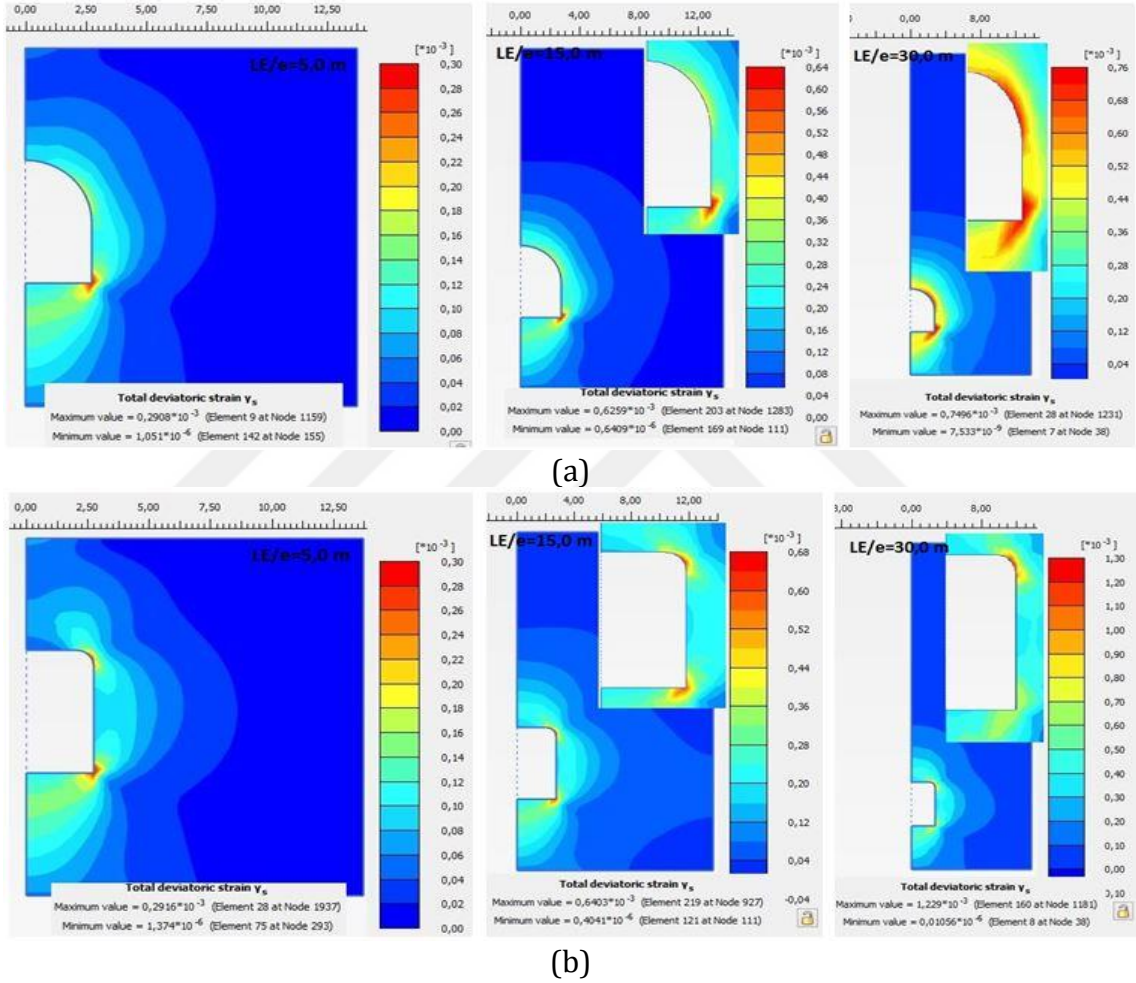


Şekil 5.3 (a) Kemer, (b) düzlem tavanlı oyma yapı için farklı örtü kalınlıklarında oluşan yer değiştirme dağılımları

Tablo 5.2 Lineer elastik bünye modeli toplam yer değiştirme değerleri

Toplam Yer Değiştirme (m)				
MODEL	ŞEKİL	5.0 m	15.0 m	30.0 m
LE	Kemer	$0,79 \cdot 10^{-3}$	$1,79 \cdot 10^{-3}$	$3,55 \cdot 10^{-3}$
	Düzlem	$0,94 \cdot 10^{-3}$	$2,17 \cdot 10^{-3}$	$4,34 \cdot 10^{-3}$

Yapılan sayısal analizler sonucunda elde edilen kayma şekil değiştirmesi dağılımları Şekil 5.4’de, sayısal değerleri Tablo 5.3’de gösterilmiştir. Şekil 5.4 incelendiğinde kemer tavanlı oyma yapıda en büyük kayma şekil değiştirmelerinin oyma yapı taban köşe noktasında olduğu, düzlem tavanlı oyma yapıda ise taban köşe noktalarına ek olarak taç köşe noktalarda da meydana geldiği görülmektedir. Kayma şekil değiştirmelerinin en büyük değerini aldığı bölgeler deviator gerilmelerinde en yüksek olduğu bölgeleri ifade etmektedir.

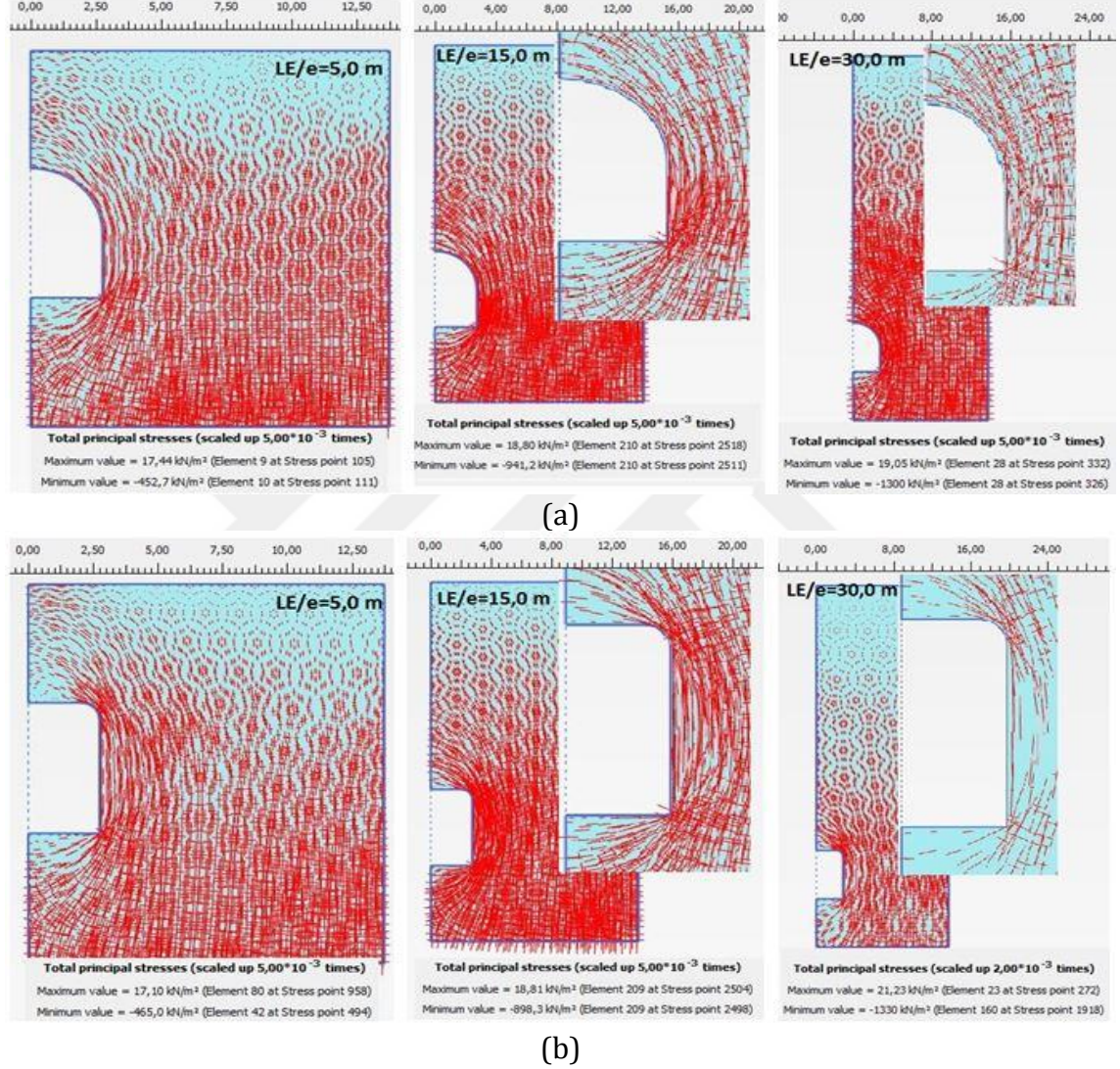


Şekil 5.4 (a) Kemer, (b) düzlem tavanlı oyma yapı için farklı örtü kalınlıklarında oluşan kayma şekil değiştirmesi dağılımları

Tablo 5.3 Lineer elastik bünye modeli kayma şekil değiştirmesi değerleri

Kayma Şekil Değiştirmesi (γ_s)							
Model	Şekil	5.0 m		15.0 m		30.0 m	
		Max	Min	Max	Min	Max	Min
LE	Kemer	$0,29 \cdot 10^{-3}$	$1,05 \cdot 10^{-6}$	$0,63 \cdot 10^{-3}$	$0,64 \cdot 10^{-6}$	$0,75 \cdot 10^{-3}$	$7,53 \cdot 10^{-9}$
	Düzlem	$0,29 \cdot 10^{-3}$	$1,37 \cdot 10^{-6}$	$0,64 \cdot 10^{-3}$	$0,40 \cdot 10^{-6}$	$1,23 \cdot 10^{-3}$	$0,01 \cdot 10^{-6}$

İncelemeler sonucunda değişimi incelenen asal gerilme dağılımları Şekil 5.5’de verilmiştir. Asal gerilmelerin maksimum ve minimum değerleri Tablo 5.4’de verilmiştir. Asal gerilme dağılımları incelendiğinde kemer tavanlı oyma yapıda taban köşe noktalarda yoğunlaştığı, düzlem tavanlı oyma yapıda ise taç ve taban köşe noktalarda yoğunlaştığı görülmektedir.

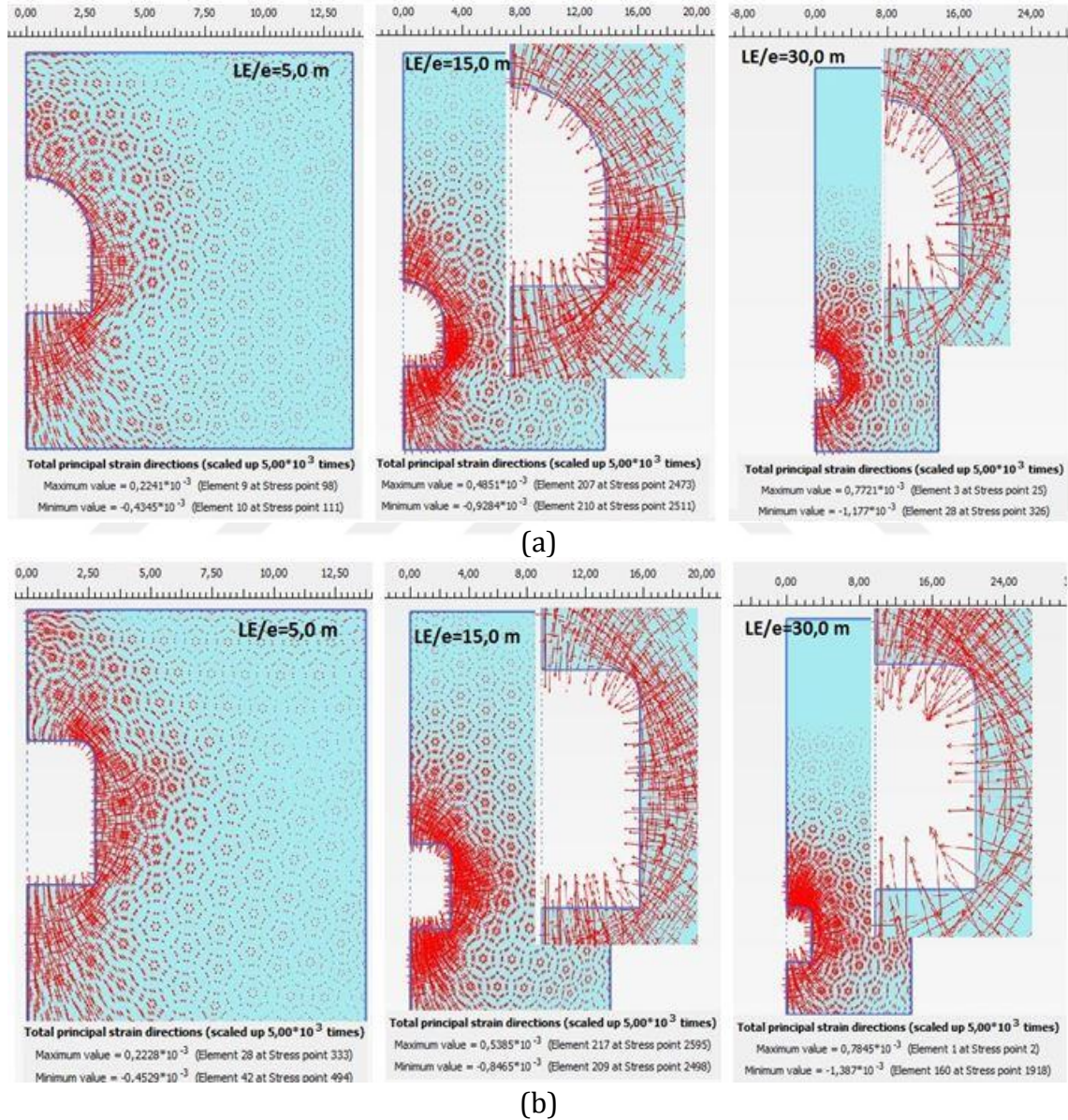


Şekil 5.5 (a) Kemer, (b) düzlem tavanlı oyma yapı için farklı örtü kalınlıklarındaki toplam asal gerilme dağılımları

Tablo 5.4 Lineer elastik bünye modeli toplam asal gerilme değerleri

Toplam Asal Gerilme (kN/m ²)							
Model	Şekil	5.0 m		15.0 m		30.0 m	
		Max	Min	Max	Min	Max	Min
LE	Kemer	17,4	-452,7	18,8	-941,2	19,05	-1300
	Düzlem	17,1	-465,0	18,81	-898,3	21,23	-1330

Analiz sonuçlarında elde edilen asal birim şekil değiştirme doğrultuları Şekil 5.6'da verilmiştir. Asal birim şekil değiştirme değerleri Tablo 5.5'de verilmiştir. Şekil 5.6 incelendiğinde asal şekil değiştirme doğrultularının kemer tavanlı oyma yapıda doğrusal yan yüzeyler ile tabanda dik olduğu, düzlem tavanlı oyma yapıda doğrusal yan yüzeyler ile taban ve taç köşe noktalarda dik olduğu görülmektedir. Asal şekil değiştirme doğrultularının dik olduğu kısımlar büyük şekil değiştirmelerin oluşabileceği bölgeleri ifade etmektedir.



Şekil 5.6 (a) Kemer, (b) düzlem tavanlı oyma yapı için farklı örtü kalınlıklarındaki toplam asal şekil değiştirme dağılımları

Tablo 5.5 Lineer elastik bünye modeli toplam asal şekil değiştirme değerleri

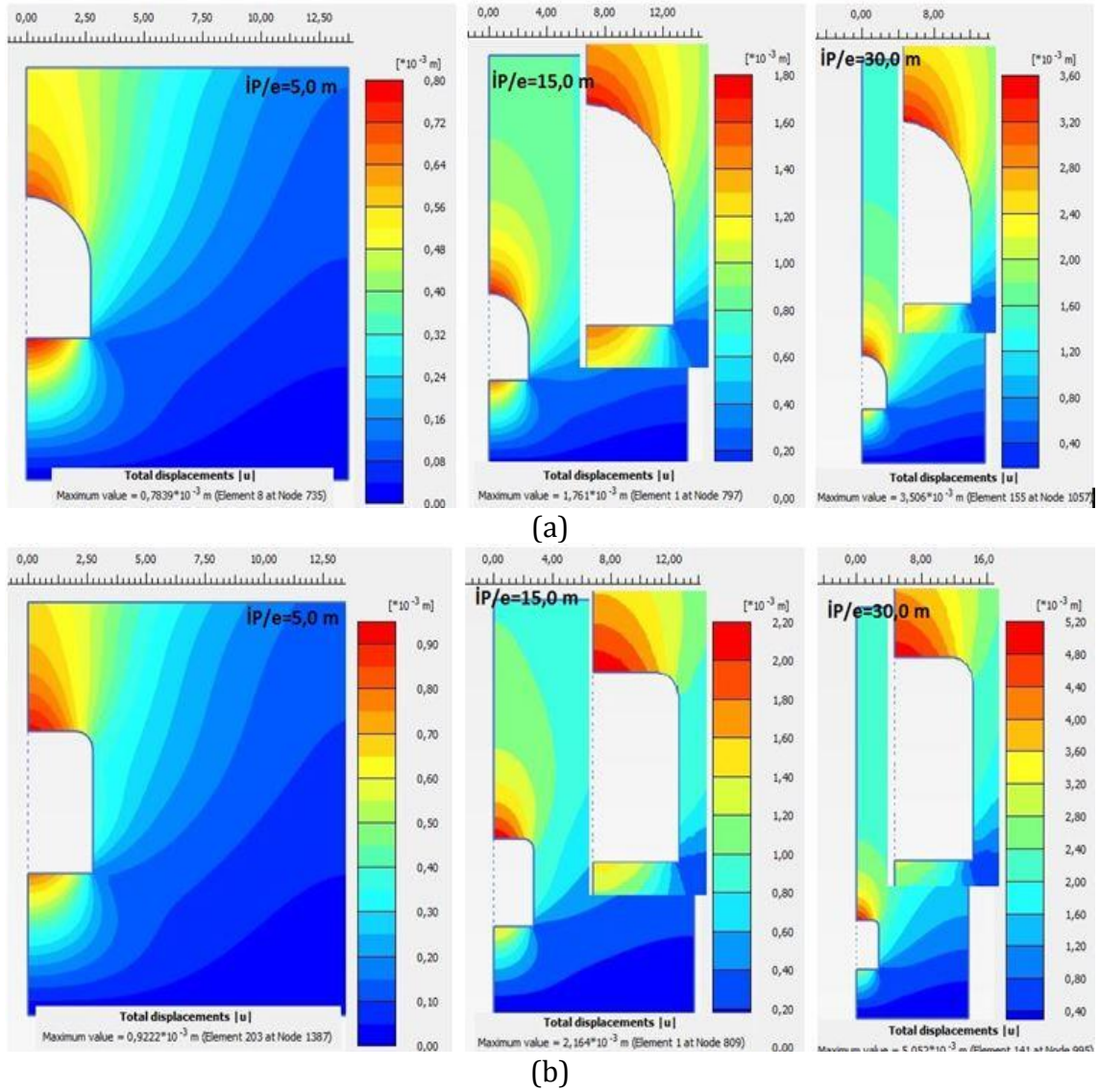
Toplam Asal Birim Şekil Değiştirme							
Model	Şekil	5.0 m		15.0 m		30.0 m	
		Max	Min	Max	Min	Max	Min
LE	Kemer	$0,22*10^{-3}$	$-0,43*10^{-3}$	$0,48*10^{-3}$	$-0,93*10^{-3}$	$0,77*10^{-3}$	$-1,18*10^{-3}$
	Düzlem	$0,22*10^{-3}$	$-0,45*10^{-3}$	$0,54*10^{-3}$	$-0,85*10^{-3}$	$0,78*10^{-3}$	$-1,39*10^{-3}$

Örtü kalınlığının artması her iki oyma yapı türünde de meydana gelen yer değiştirme, kayma şekil değiştirmesi ve toplam asal gerilme büyüklüklerini arttırmıştır. Aynı zamanda örtü kalınlığının artması, yer değiştirme, asal gerilme ve asal şekil değiştirmelerde kemer tavanlı oyma yapıda taç köşe noktalarının da kritik olabileceği sonucunu ortaya çıkartmaktadır. Kemer tavanlı oyma yapıda oluşan değerlerin, düzlem tavanlı oyma yapıya göre daha düşük sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu durum oluşturulan kemer sisteminin ortamda çekme gerilmesi oluşturmaması ve daha küçük kayma gerilmesi oluşturmaması ile açıklanabilmektedir.

5.2.2 İdeal Plastik Bünye Modeli Analiz Sonuçları

Sayısal analizlerde oyma yapı için incelenen tüm durumlar Mohr-Coulomb akma kriterini göz önünde bulunduran İdeal Plastik bünye modeli kullanılarak da yinelenmiştir. Analizler sonucunda elde edilen yer değiştirme dağılımları Şekil 5.7’de, yer değiştirme değerleri Tablo 5.6’da verilmiştir. Şekil 5.7 incelendiğinde oyma yapı davranışının Lineer Elastik bünye modeli ile benzer davranış gösterdiği görülmektedir. Örtü yükünün artması oluşan yer değiştirme büyüklüklerini arttırmış ve yer değiştirmeler açısından taç kısmının daha kritik olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır.

İncelen diğer bir durum olan kayma şekil değiştirmesi dağılımları Şekil 5.8’de gösterilmiştir. Kayma şekil değiştirmesi değerleri Tablo 5.7’de verilmiştir. Kayma şekil değiştirmeleri içinde davranışın lineer elastik bünye modeli ile benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Düşük örtü kalınlığında her iki oyma yapı türü içinde taban köşe noktalar en büyük değeri verirken, artan örtü kalınlığında en büyük kayma şekil değiştirmeleri taç köşe noktalarda oluşmaktadır. Kemer tavanlı oyma yapıda, düzlem tavanlı oyma yapıya göre daha küçük değerler elde edilmiştir.



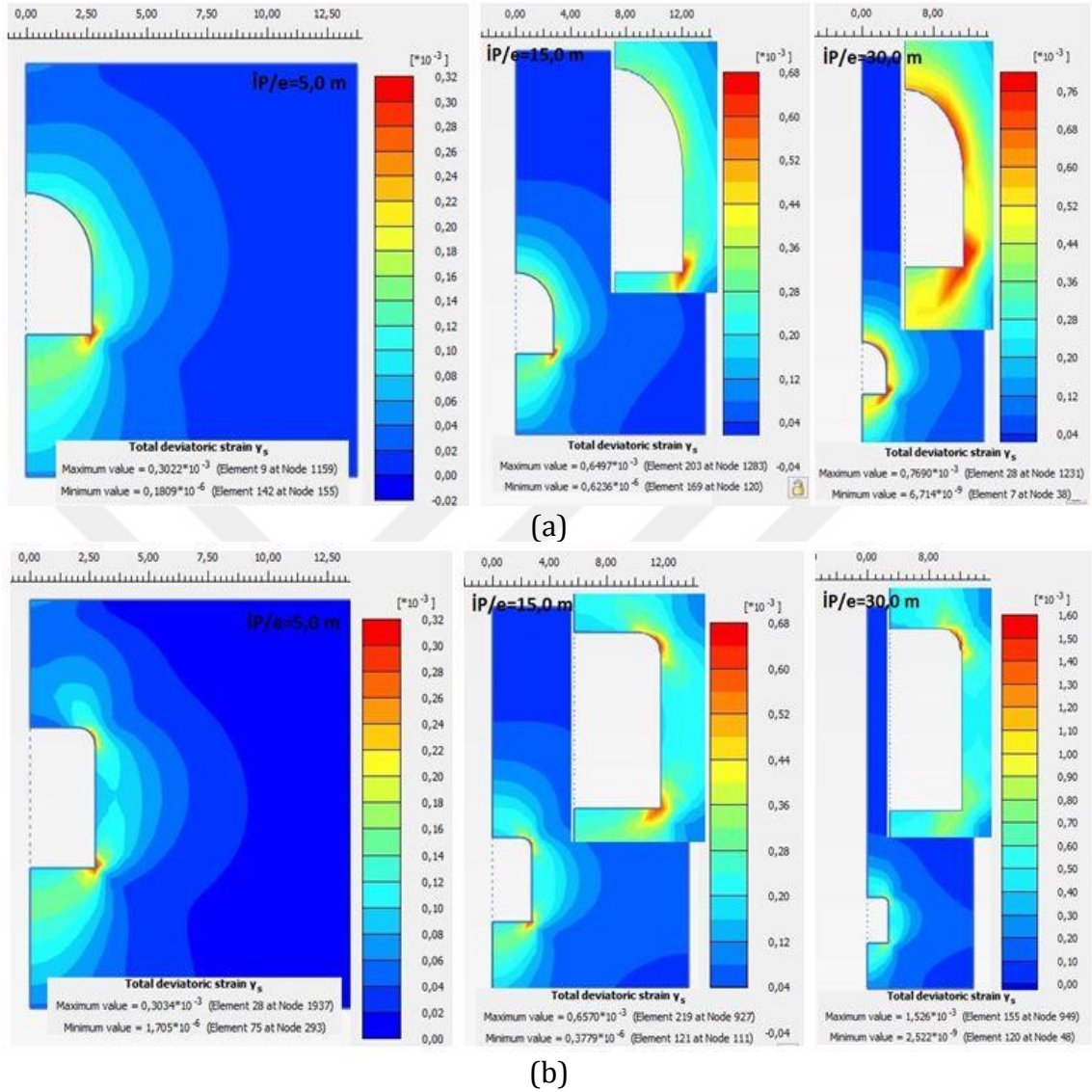
Şekil 5.7 (a) Kemer, (b) düzlem tavanlı oyma yapı için farklı örtü kalınlıklarında oluşan yer değiştirme dağılımları

Tablo 5.6 İdeal plastik bünye modeli toplam yer değiştirme değerleri

Toplam Yer Değiştirme (m)				
MODEL	ŞEKİL	5.0 m	15.0 m	30.0 m
İP	Kemer	$0,78 \cdot 10^{-3}$	$1,76 \cdot 10^{-3}$	$3,51 \cdot 10^{-3}$
	Düzlem	$0,92 \cdot 10^{-3}$	$2,16 \cdot 10^{-3}$	$5,05 \cdot 10^{-3}$

İdeal plastik analizler sonucunda tüm örtü kalınlıkları için elde edilen toplam asal gerilme dağılımları Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Oyma yapı etrafında oluşan en büyük ve en küçük toplam asal gerilme değerleri Tablo 5.8'de verilmiştir. Şekil 5.9 incelendiğinde kemer tavanlı oyma yapıda asal gerilmelerin taban köşe noktalarda yoğunlaştığı, düzlem tavanlı oyma yapıda ise taç ve taban köşe noktalarda

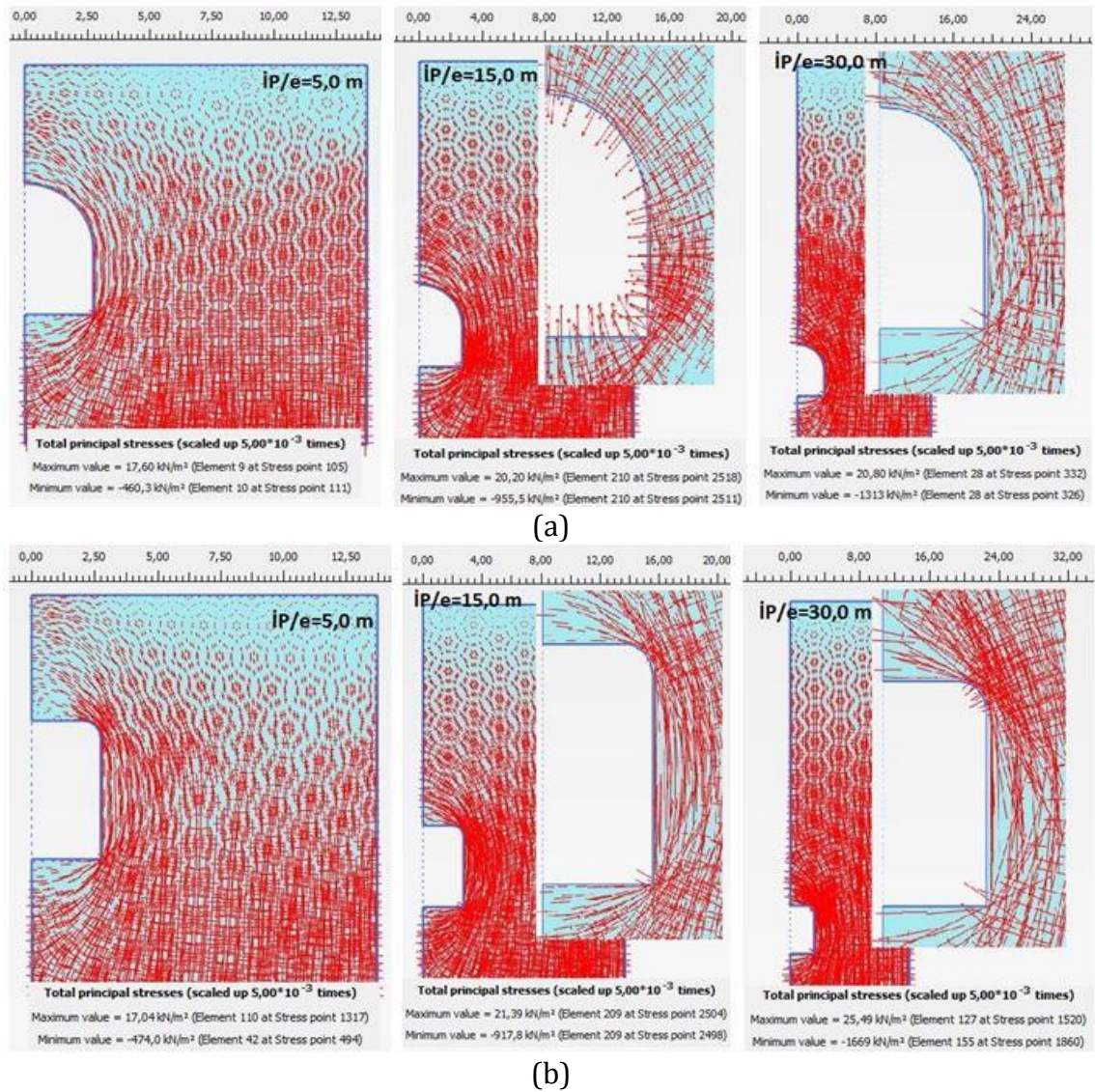
yoğunlaştığı görülmektedir. Artan örtü kalınlığı oluşan asal gerilme büyüklüklerini arttırmıştır.



Şekil 5.8 (a) Kemer, (b) düzlem tavanlı oyma yapı için farklı örtü kalınlıklarında oluşan kayma şekil değiştirmesi dağılımları

Tablo 5.7 İdeal plastik bünye modeli kayma şekil değiştirmesi değerleri

Kayma Şekil Değiştirmesi (γ_s)							
Model	Şekil	5.0 m		15.0 m		30.0 m	
		Max	Min	Max	Min	Max	Min
İP	Kemer	$0,30 \cdot 10^{-3}$	$0,18 \cdot 10^{-6}$	$0,65 \cdot 10^{-3}$	$0,62 \cdot 10^{-6}$	$0,77 \cdot 10^{-3}$	$6,71 \cdot 10^{-9}$
	Düzlem	$0,30 \cdot 10^{-3}$	$1,71 \cdot 10^{-6}$	$0,66 \cdot 10^{-3}$	$0,38 \cdot 10^{-6}$	$1,53 \cdot 10^{-3}$	$2,52 \cdot 10^{-9}$



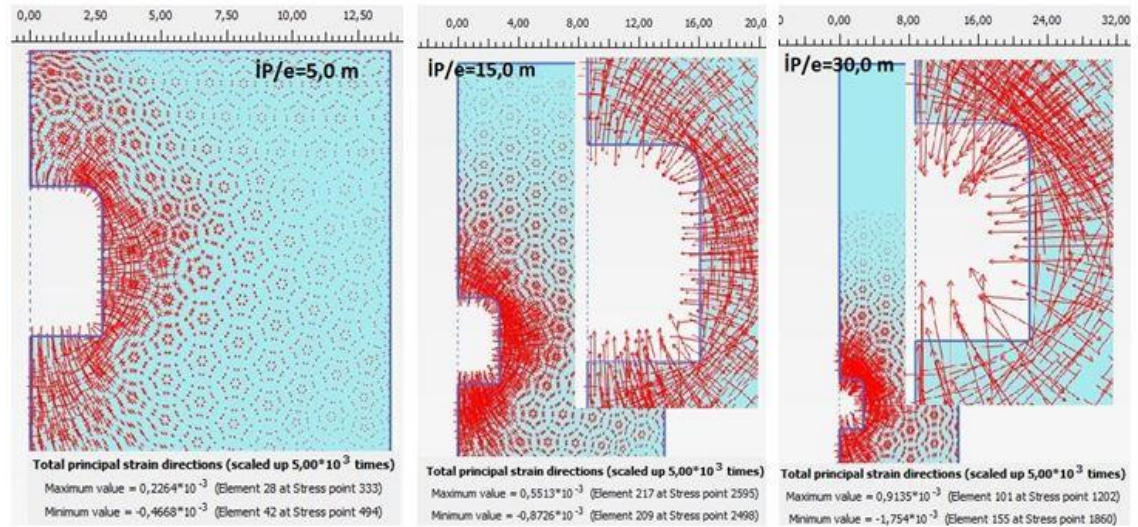
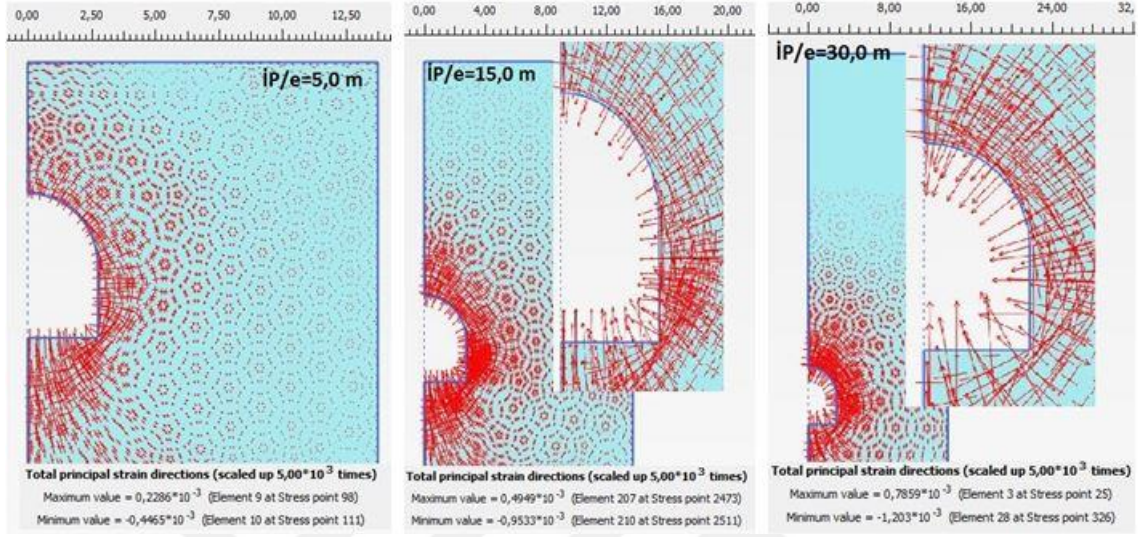
Şekil 5.9 (a) Kemer, (b) düzlem tavanlı oyma yapı için farklı örtü kalınlıklarındaki toplam asal gerilme dağılımları

Tablo 5.8 İdeal plastik bünye modeli toplam asal gerilme değerleri

Toplam Asal Gerilme (kN/m ²)							
Model	Şekil	5.0 m		15.0 m		30.0 m	
		Max	Min	Max	Min	Max	Min
İP	Kemer	17,6	-460,3	20,2	-955,5	20,8	-1313,0
	Düzlem	17,04	-474,0	21,39	-917,8	25,49	-1669,0

İdeal plastik analiz sonuçlarında elde edilen asal birim şekil değiştirme doğrultuları Şekil 5.10'da verilmiştir. Asal birim şekil değiştirme değerleri Tablo 5.9'da verilmiştir. Şekil 5.10 incelendiğinde asal şekil değiştirme doğrultularının kemer tavanlı oyma yapıda doğrusal yan yüzeyler ile tabanda dik olduğu, düzlem tavanlı oyma yapıda doğrusal yan yüzeyler ile taban ve taç köşe noktalarda dik

olduğu görülmektedir. Asal şekil değiştirme doğrultularının dik olduğu kısımlar büyük şekil değiştirmelerin oluşabileceği bölgeleri ifade etmektedir. Artan örtü kalınlığı ile asal birim şekil değiştirmelerin düzlem tavanlı oyma yapıda taç kısmında daha kritik olduğu görülmektedir.



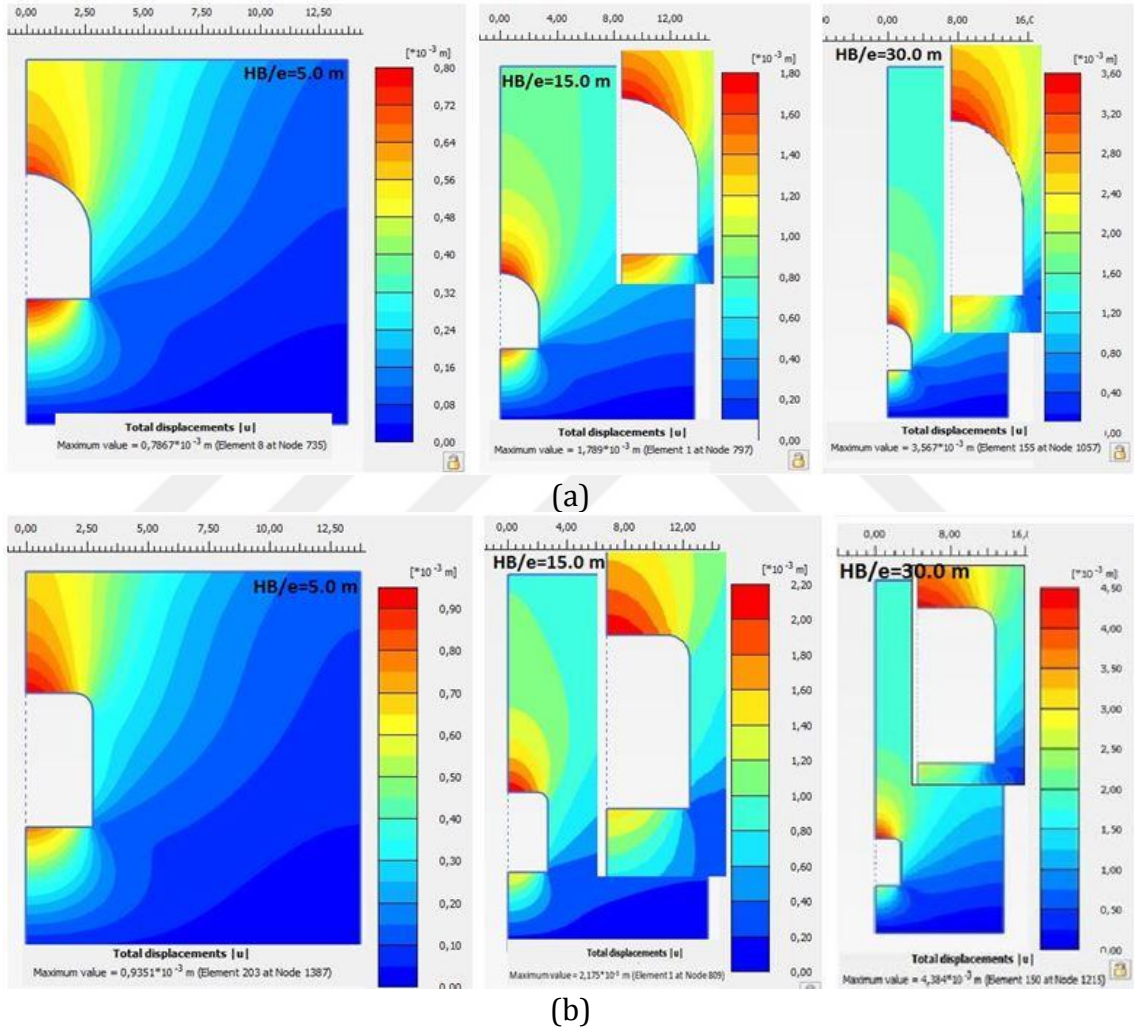
Şekil 5.10 (a) Kemer, (b) düzlem tavanlı oyma yapı için farklı örtü kalınlıklarındaki toplam asal şekil değiştirme dağılımları

Tablo 5.9 İdeal plastik bünye modeli toplam asal birim şekil değiştirme değerleri

Toplam Asal Birim Şekil Değiştirme							
Model	Şekil	5.0 m		15.0 m		30.0 m	
		Max	Min	Max	Min	Max	Min
İP	Kemer	$0,23 \cdot 10^{-3}$	$-0,45 \cdot 10^{-3}$	$0,49 \cdot 10^{-3}$	$-0,95 \cdot 10^{-3}$	$0,79 \cdot 10^{-3}$	$-1,20 \cdot 10^{-3}$
	Düzlem	$0,23 \cdot 10^{-3}$	$-0,47 \cdot 10^{-3}$	$0,55 \cdot 10^{-3}$	$-0,87 \cdot 10^{-3}$	$0,91 \cdot 10^{-3}$	$-1,75 \cdot 10^{-3}$

5.2.3 Hoek-Brown Bünye Modeli Analiz Sonuçları

Hoek-Brown bünye modeli analizleri sonucunda elde edilen yer değiştirme dağılımları Şekil 5.11’de, yer değiştirme değerleri Tablo 5.10’da verilmiştir. Şekil 5.11 incelendiğinde oyma yapı davranışının Lineer Elastik bünye modeli ile benzer davranış gösterdiği görülmektedir. Örtü yükünün artması oluşan yer değiştirme büyüklüklerini arttırmış ve yer değiştirmeler açısından taç kısmının daha kritik olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır.

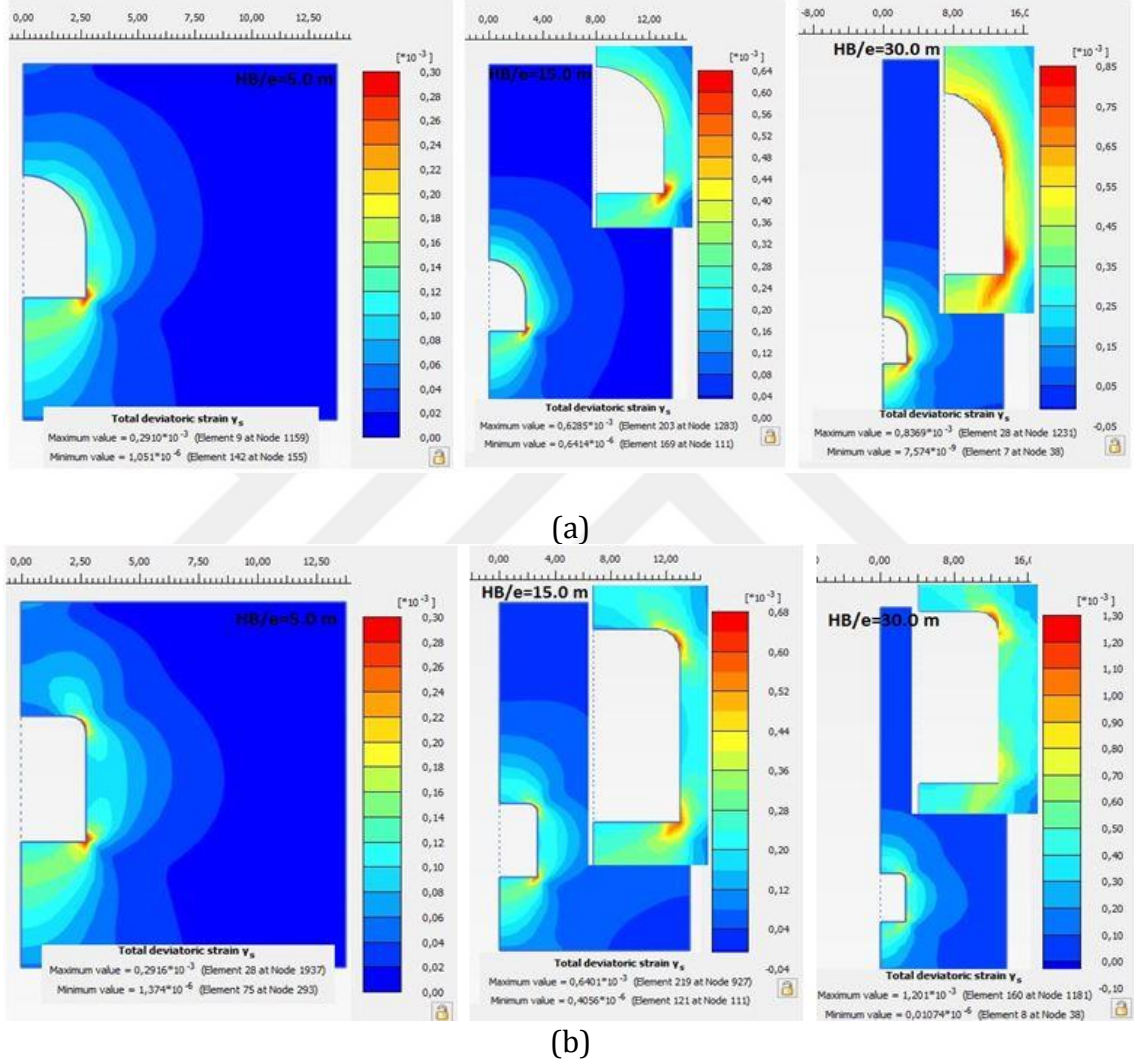


Şekil 5.11 (a) Kemer, (b) düzlem tavanlı oyma yapı için farklı örtü kalınlıklarında oluşan yer değiştirme dağılımları

Tablo 5.10 Hoek-Brown bünye modeli toplam yer değiştirme değerleri

Toplam Yer Değiştirme (m)				
MODEL	ŞEKİL	5.0 m	15.0 m	30.0 m
HB	Kemer	$0,79 \cdot 10^{-3}$	$1,79 \cdot 10^{-3}$	$3,57 \cdot 10^{-3}$
	Düzlem	$0,94 \cdot 10^{-3}$	$2,18 \cdot 10^{-3}$	$4,38 \cdot 10^{-3}$

İncelen diğer bir durum olan kayma şekil değiştirmesi dağılımları Şekil 5.12’de, kayma şekil değiştirmesi değerleri Tablo 5.11’de verilmiştir. Kayma şekil değiştirmeleri içinde davranışın lineer elastik bünye modeli ile benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Düşük örtü kalınlığında her iki oyma yapı türü içinde taban köşe noktalar en büyük değeri verirken, artan örtü kalınlığında en büyük kayma şekil değiştirmeleri taç köşe noktalarda oluşmaktadır.

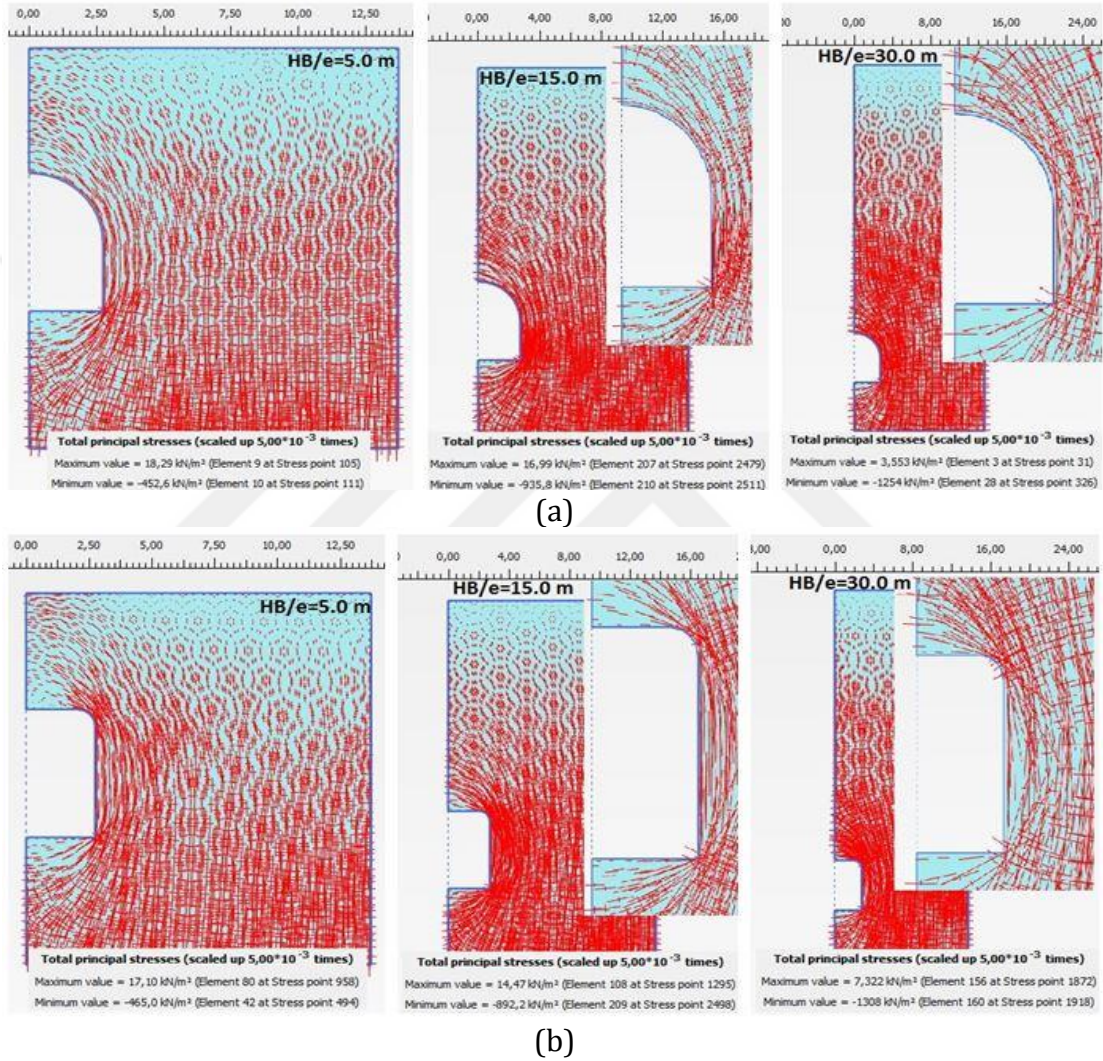


Şekil 5.12 (a) Kemer, (b) düzlem tavanlı oyma yapı için farklı örtü kalınlıklarında oluşan kayma şekil değiştirmesi dağılımları

Tablo 5.11 Hoek-Brown bünye modeli kayma şekil değiştirmesi değerleri

Kayma Şekil Değiştirmesi (γ_s)							
Model	Şekil	5.0 m		15.0 m		30.0 m	
		Max	Min	Max	Min	Max	Min
HB	Kemer	$0,29 \cdot 10^{-3}$	$1,05 \cdot 10^{-6}$	$0,63 \cdot 10^{-3}$	$0,64 \cdot 10^{-6}$	$0,84 \cdot 10^{-3}$	$7,57 \cdot 10^{-9}$
	Düzlem	$0,29 \cdot 10^{-3}$	$1,37 \cdot 10^{-6}$	$0,64 \cdot 10^{-3}$	$0,41 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$0,01 \cdot 10^{-6}$

Analizler sonucunda elde edilen toplam asal gerilme dağılımları Şekil 5.13'de, oyma yapı etrafında oluşan asal gerilme değerleri Tablo 5.12'de verilmiştir. Şekil 5.13 incelendiğinde kemer tavanlı oyma yapıda asal gerilmelerin taban köşe noktalarda yoğunlaştığı, düzlem tavanlı oyma yapıda ise taç ve taban köşe noktalarda yoğunlaştığı görülmektedir. Artan örtü kalınlığı oluşan asal gerilme büyüklüklerini arttırmıştır.

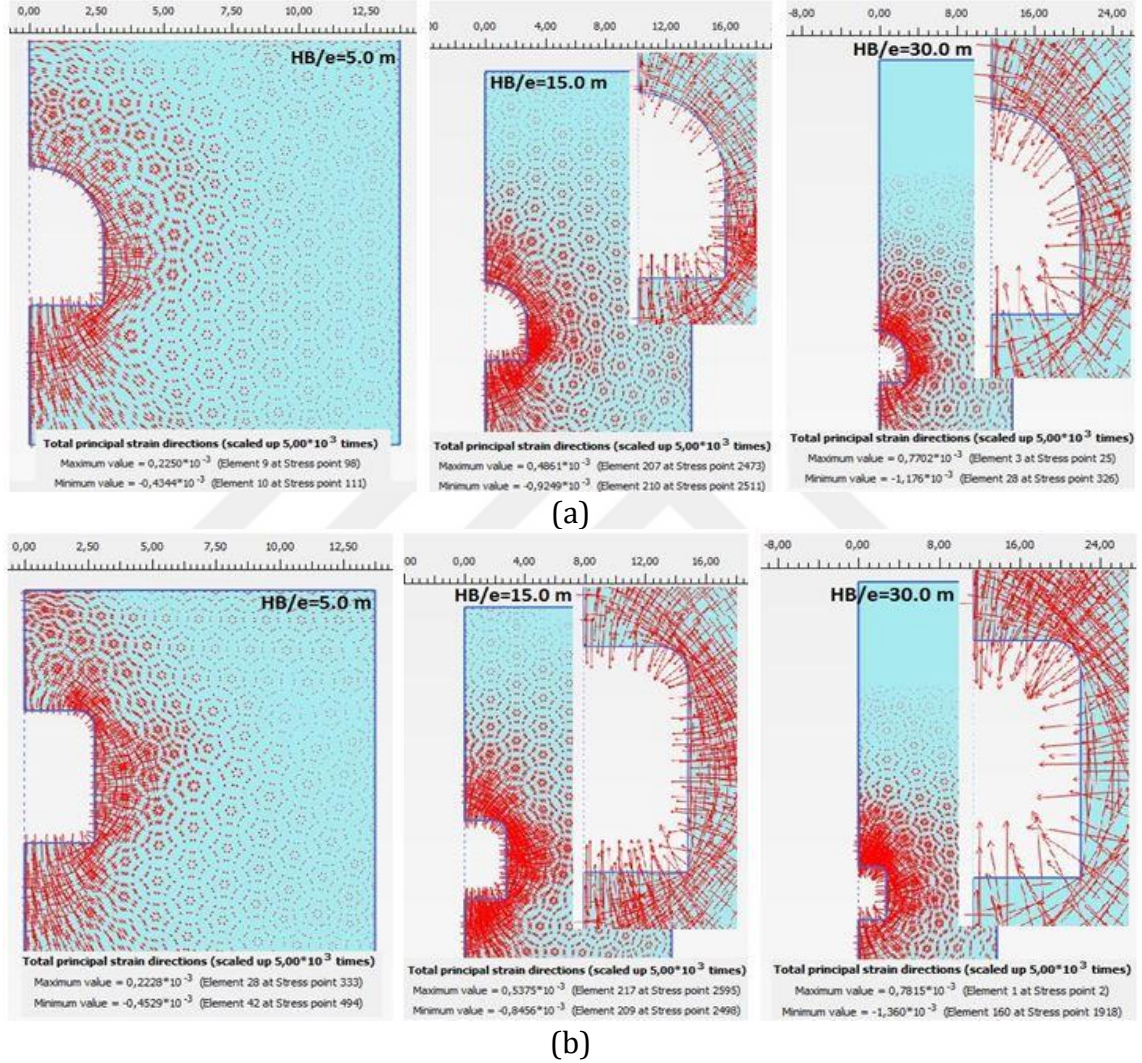


Şekil 5.13 (a) Kemer, (b) düzlem tavanlı oyma yapı için farklı örtü kalınlıklarındaki toplam asal gerilme dağılımları

Tablo 5.12 Hoek-Brown bünye modeli toplam asal gerilme değerleri

Toplam Asal Gerilme (kN/m ²)							
Model	Şekil	5.0 m		15.0 m		30.0 m	
		Max	Min	Max	Min	Max	Min
HB	Kemer	18,29	-452,6	16,99	-935,8	3,55	-1254,0
	Düzlem	17,1	-465,0	14,47	-892,2	7,32	-1308,0

Analiz sonuçlarında elde edilen asal birim şekil değiştirme doğrultuları Şekil 5.14'de, asal birim şekil değiştirme değerleri Tablo 5.13'de verilmiştir. Şekil 5.14 incelendiğinde asal şekil değiştirme doğrultularının da diğer bünye modelleri ile benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Kemer tavanlı oyma yapıda doğrusal yan yüzeyler ile tabanda dik olduğu, düzlem tavanlı oyma yapıda doğrusal yan yüzeyler ile taban ve taç köşe noktalarda dik olduğu görülmektedir.

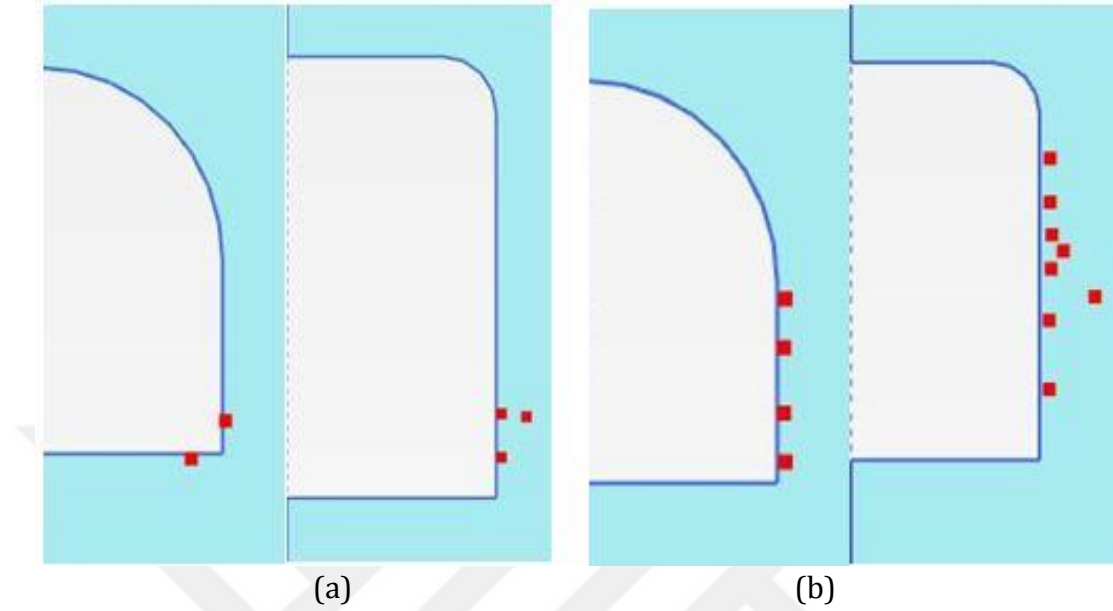


Şekil 5.14 (a) Kemer, (b) düzlem tavanlı oyma yapı için farklı örtü kalınlıklarındaki toplam asal şekil değiştirme dağılımları

Tablo 5.13 Hoek-Brown bünye modeli toplam asal birim şekil değiştirme değerleri

Toplam Asal Birim Şekil Değiştirme							
Model	Şekil	5.0 m		15.0 m		30.0 m	
		Max	Min	Max	Min	Max	Min
HB	Kemer	$0,23 \cdot 10^{-3}$	$-0,43 \cdot 10^{-3}$	$0,49 \cdot 10^{-3}$	$-0,92 \cdot 10^{-3}$	$0,77 \cdot 10^{-3}$	$-1,18 \cdot 10^{-3}$
	Düzlem	$0,22 \cdot 10^{-3}$	$-0,45 \cdot 10^{-3}$	$0,54 \cdot 10^{-3}$	$-0,85 \cdot 10^{-3}$	$0,78 \cdot 10^{-3}$	$-1,36 \cdot 10^{-3}$

Hoek-Brown bünye modeli sonucunda örtü kalınlığının 15.0 m ve 30.0 m olması durumunda oyma yapı etrafında plastik noktalar oluşmuştur. Oluşan plastik noktalar Şekil 5.15’de gösterilmiştir.



Şekil 5.15 Örtü kalınlığı (a) 15.0 m, (b) 30.0 m olduğunda oluşan plastik noktalar

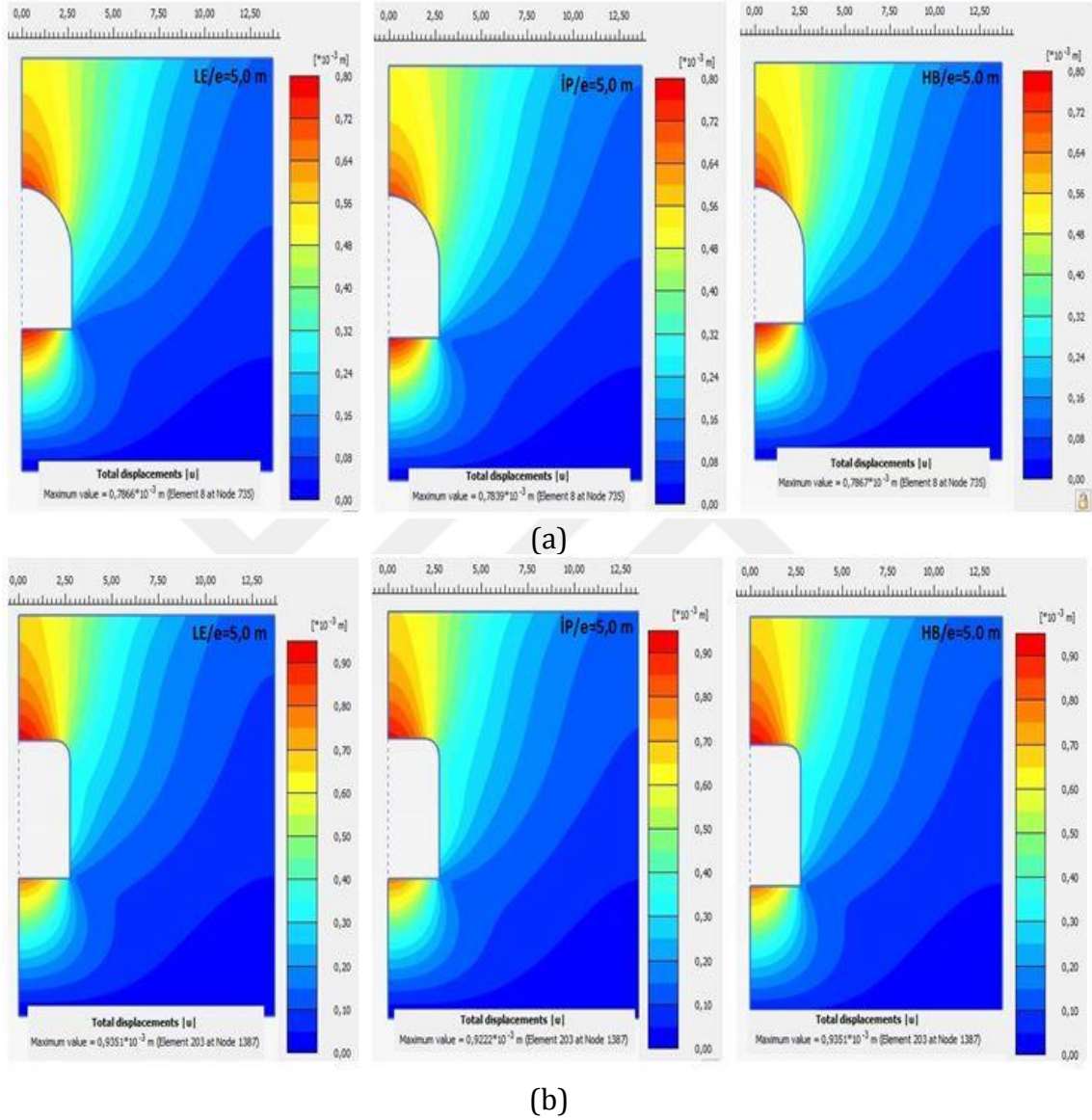
Şekil 5.15’e bakıldığında, plastik noktaların taban köşelerinde olduğu görülmektedir. Oluşan plastik noktalar örtü kalınlığının artması ile birlikte artmış ve oyma yapı kenarına doğru yayılım göstermiştir. Plastik nokta sayısının az olması ortamda göçme olmadığını fakat bu noktalarda plastik şekil değiştirmelerin oluştuğunu ifade etmektedir. Düzlem tavanlı oyma yapıda oluşan plastik nokta sayısının kemer tavanlı oyma yapıya göre daha az olması kemer yapı etkisinin önemini tekrar ortaya koymaktadır.

5.3 Bünye Modeline göre Sayısal Analizler

Yapılan analizler sonucunda elde edilen yer değiştirme, kayma şekil değiştirmesi, asal gerilme ve asal şekil değiştirmeler bu bölümde minimum örtü kalınlığı için bünye modellerine göre karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Örtü kalınlığının beş metre olması durumunda elde edilen yer değiştirme dağılımları Şekil 5.16’da gösterilmiştir. Şekil 5.16 incelendiğinde tüm bünye modellerinde en büyük yer değiştirmeler oyma yapı taç kısmında oluşmuştur. Tüm bünye modelleri sonucunda elde edilen değerlerin birbirine çok yakın çıkması

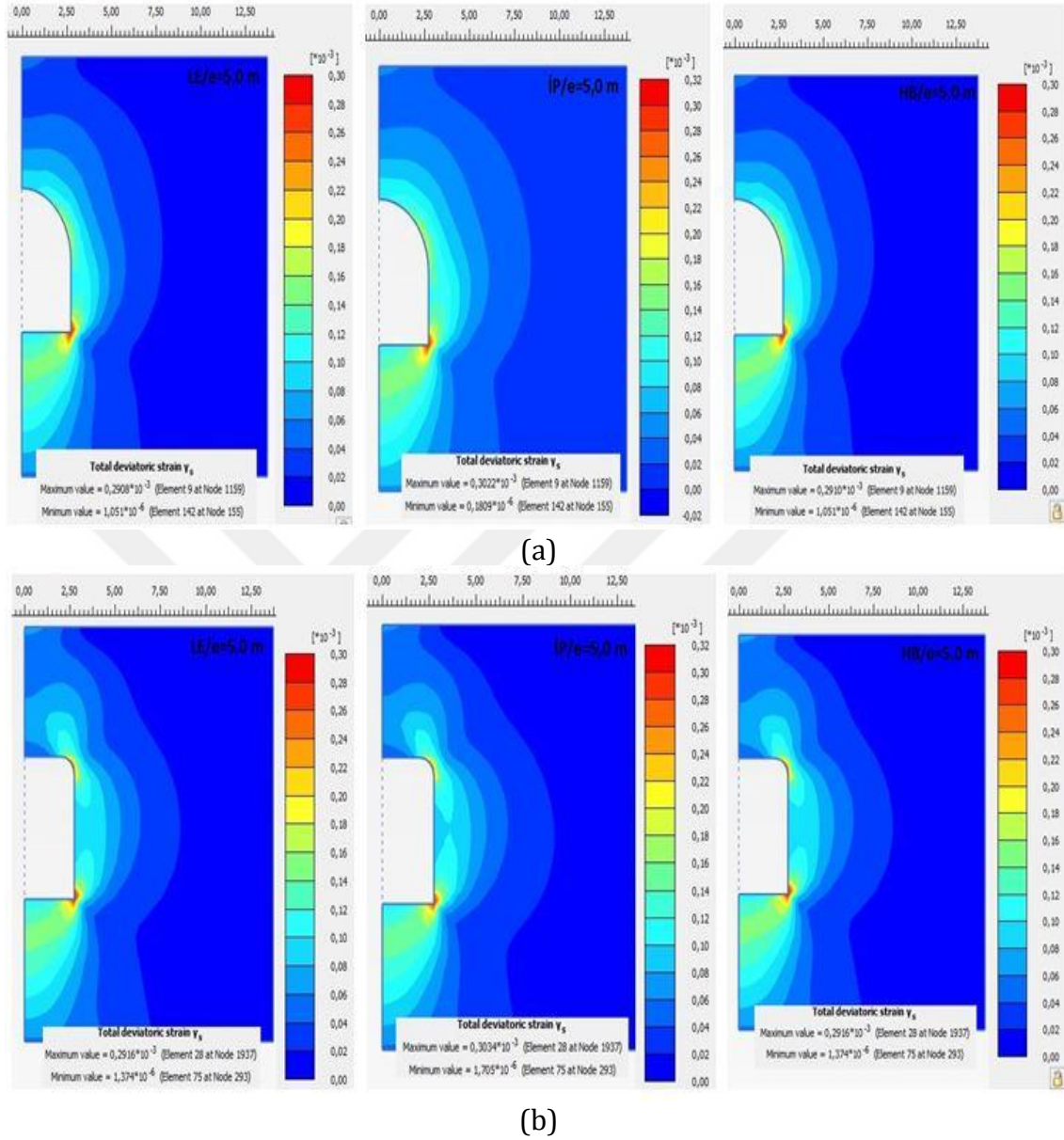
seçilen parametrelerin elastik sınırlar içerisinde kaldığını göstermektedir. Seçilen parametrelerin elastik sınırlar içerisinde kalması ortamda plastik şekil değiştirmelerin oluşmadığını göstermektedir. Analizler sonucunda minimum örtü kalınlığında plastik noktaların oluşmaması da bu durumu desteklemektedir.



Şekil 5.16 Bünye modellerine göre oyma yapı etrafında oluşan toplam yer değiştirme dağılımları

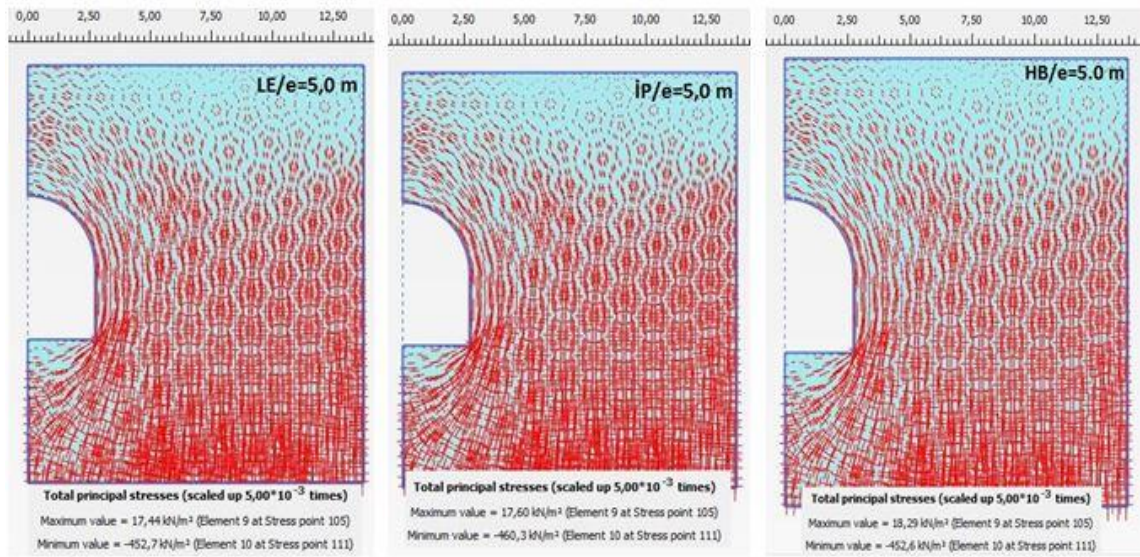
Bünye modellerine göre yapılan değerlendirmede elde edilen kayma şekil değiştirmesi dağılımları Şekil 5.17’de gösterilmiştir. Şekil 5.17 incelendiğinde tüm bünye modellerinde oyma yapının benzer davranış gösterdiği görülmektedir. Minimum örtü kalınlığı altında kemer tavanlı oyma yapıda en büyük kayma şekil

değiştirmelerinin taban köşe noktada oluştuğu, düzlem tavanlı oyma yapıda ise taban köşe noktalarına ek olarak taç köşe noktalarda da oluştuğu görölmektedir.

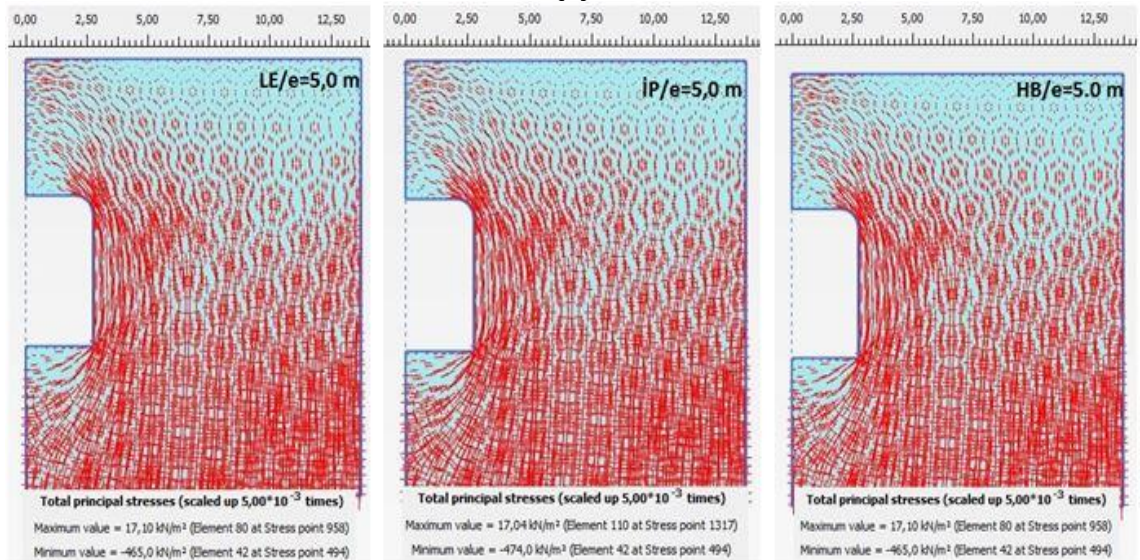


şekil 5.17 Bünye modellerine göre oyma yapı etrafında oluşan toplam kayma şekil değiştirmesi dağılımları

Bünye modellerine göre yapılan değerlendirmede elde edilen asal gerilme dağılımları şekil 5.18’de gösterilmiştir. şekil 5.18 incelendiğinde tüm bünye modellerinin benzer sonuçlar verdiği görölmektedir. Kemer tavanlı oyma yapıda asal gerilmelerin taban köşe noktalarda yoğunlaştığı, düzlem tavanlı oyma yapıda ise taban köşe noktalarına ek olarak taç köşe noktalarda da yoğunlaştığı görölmektedir.



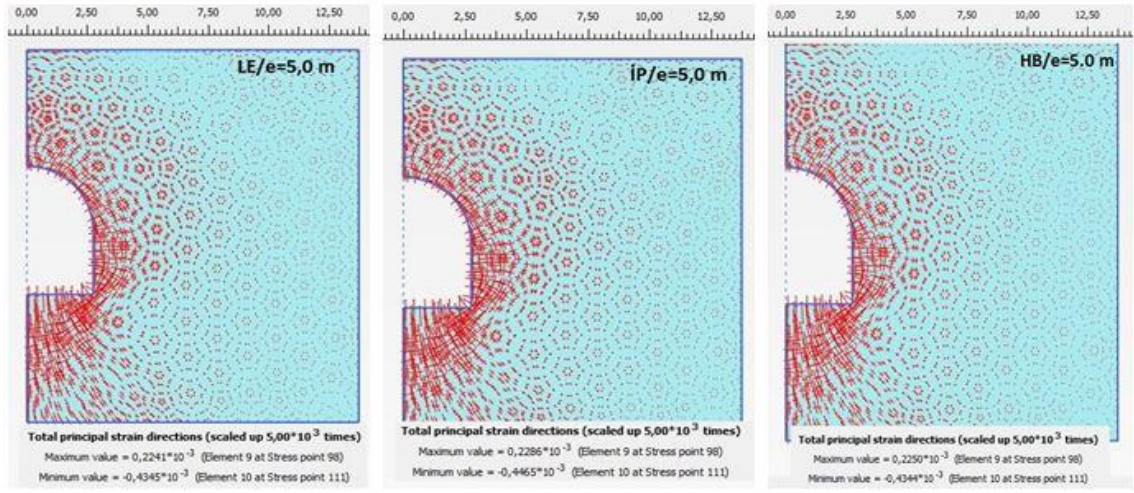
(a)



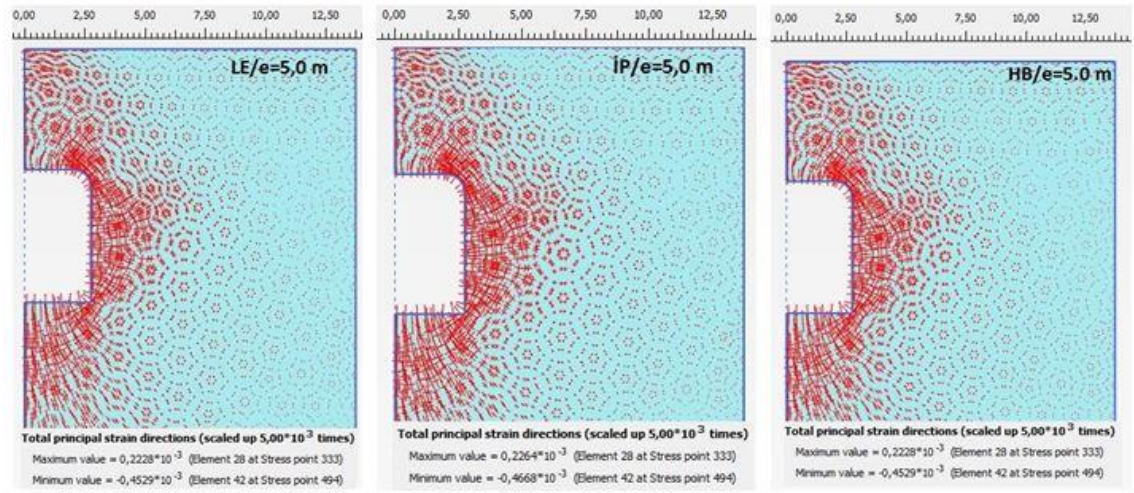
(b)

Şekil 5.18 Bünye modellerine göre oyma yapı etrafında oluşan toplam asal gerilme dağılımları

Bünye modellerine göre karşılaştırılan diğer bir durum olan toplam asal birim şekil değiştirme doğrultuları Şekil 5.19’da gösterilmiştir. Şekil 5.19 incelendiğinde asal şekil değiştirmelerin kemer tavanlı oyma yapıda taban köşe noktalarda yaygınlaştığı, düzlem tavanlı oyma yapıda taç köşe noktalarda da yoğunlaştığı görülmektedir. Tüm bünye modellerinde oyma yapılar benzer davranış göstermiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.19 Bünye modellerine göre oyma yapı etrafında oluşan toplam asal birim şekil değiştirme doğrultuları

5.4 Duyarlılık ve Parametre Analizi

Bu bölüme kadar farklı bünye modelleri kullanılarak oluşturulan analizler sonucunda, oyma yapıların yük altında gösterdikleri davranış şekli belirlenmiştir. Yer değiştirme, kayma şekil değiştirmesi ve asal gerilme değerlerinin kritik olduğu noktalar belirlenmiş ve değerlendirmeler yapılmıştır.

Bu bölümde; incelenen yer değiştirme, kayma şekil değiştirmesi ve asal gerilme değerlerini, hangi parametrelerin daha çok etkilediğini belirlemek amacı ile duyarlılık (sensitivite) ve parametre analizi yapılmıştır. Duyarlılık ve parametre analizinde malzeme parametre değer aralıkları belirlenir ve bu değerlerin, alt ve üst sınırları kullanılarak olası tüm kombinasyonlar oluşturulur. Sayısal modellerde

referans değerler kullanılarak gerekli analiz yapıldıktan sonra, oluşturulan tüm kombinasyonlar için analizler yinelenir. Seçilen parametre çokluğuna bağlı olarak analizlerin çözümü çok uzun sürebilmektedir. Bu sebeple oluşturulan tüm kombinasyonlar ile çözümleme yapılmadan önce duyarlılık analizi ile değişken değerlerin, gerilme, yer değiştirme ve güvenlik sayısı üzerindeki hassaslık oranı belirlenir. Bu oranın yüzde beşin üzerinde olduğu değişkenler ile parametre analizi yapılarak olası tüm durumlar değerlendirilir (Plaxis manual,2019).

İdeal plastik ve Hoek-Brown bünye modelleri kullanılarak yapılan duyarlılık ve parametre analizi sonucunda elde edilen bilgiler alt bölümlerde verilmiştir.

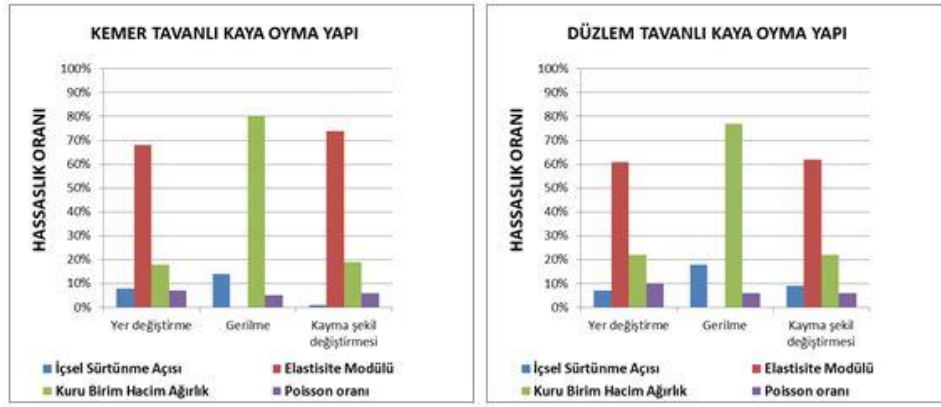
5.4.1 İdeal Plastik Bünye Modeli ile Sensitivite ve Parametre Analizi

Mohr-Coulomb akma kriterini göz önünde bulunduran İdeal Plastik bünye modelinde elastisite modülü, poisson oranı, birim hacim ağırlık, kohezyon ve içsel sürtünme açısını tanımlamak gerekmektedir. Tanımlanması gereken bu parametreler ile yapılan duyarlılık analizinde kullanılan minimum, maksimum ve referans değerler Tablo 5.14’de verilmiştir.

Tablo 5.14 İdeal plastik bünye modeli duyarlılık analizi parametre değerleri

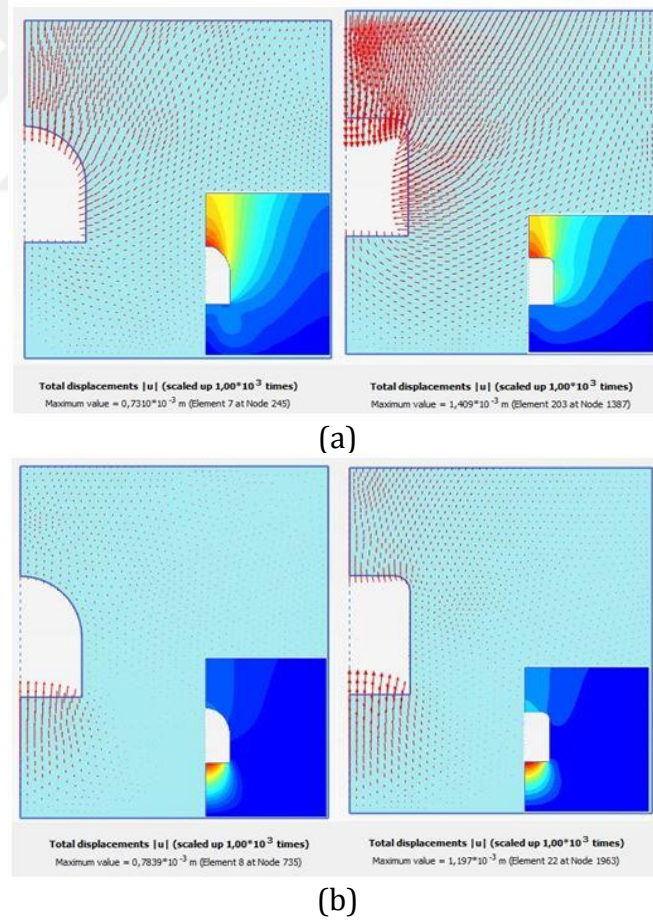
Katsayı	Sembol	Birim	Minimum	Referans	Maksimum
Kuru birim hacim ağırlık	γ_k	kN/m ³	12	14	16
Elastisite Modülü	E_d	MPa	550	7000	1500
Poisson oranı	ν	-	0,2	0,25	0,3
Kohezyon	c	MPa	0,9	1,0	2,2
İçsel sürtünme açısı	θ	°	16	26	40
Çekme gerilmesi	σ_T	MPa	0,3	0,5	0,7

Tablo 5.14’de verilen değerler ile yapılan duyarlılık analizi sonucunda gerilme, yer değiştirme ve kayma şekil değiştirmesi üzerindeki etken parametreler belirlenmiştir. Etken parametreler belirlenirken oyma yapı etrafında seçilen dört farklı nokta için hassasiyet oranlarına bakılmış ve yüzde beşin üzerinde olan değerler Şekil 5.20’de gösterilmiştir. Şekil 5.20 incelendiğinde her iki oyma yapı türü içinde yer değiştirme ile kayma şekil değiştirmesi üzerinde elastisite modülü ve birim hacim ağırlık değerinin, gerilmeler üzerinde birim hacim ağırlık ve içsel sürtünme açısı değerlerinin büyük oranlarda etken olduğu görülmektedir.



Şekil 5.20 İdeal plastik bünye modeli için sensitivite analizi ile elde edilen etken parametre yüzdeleri

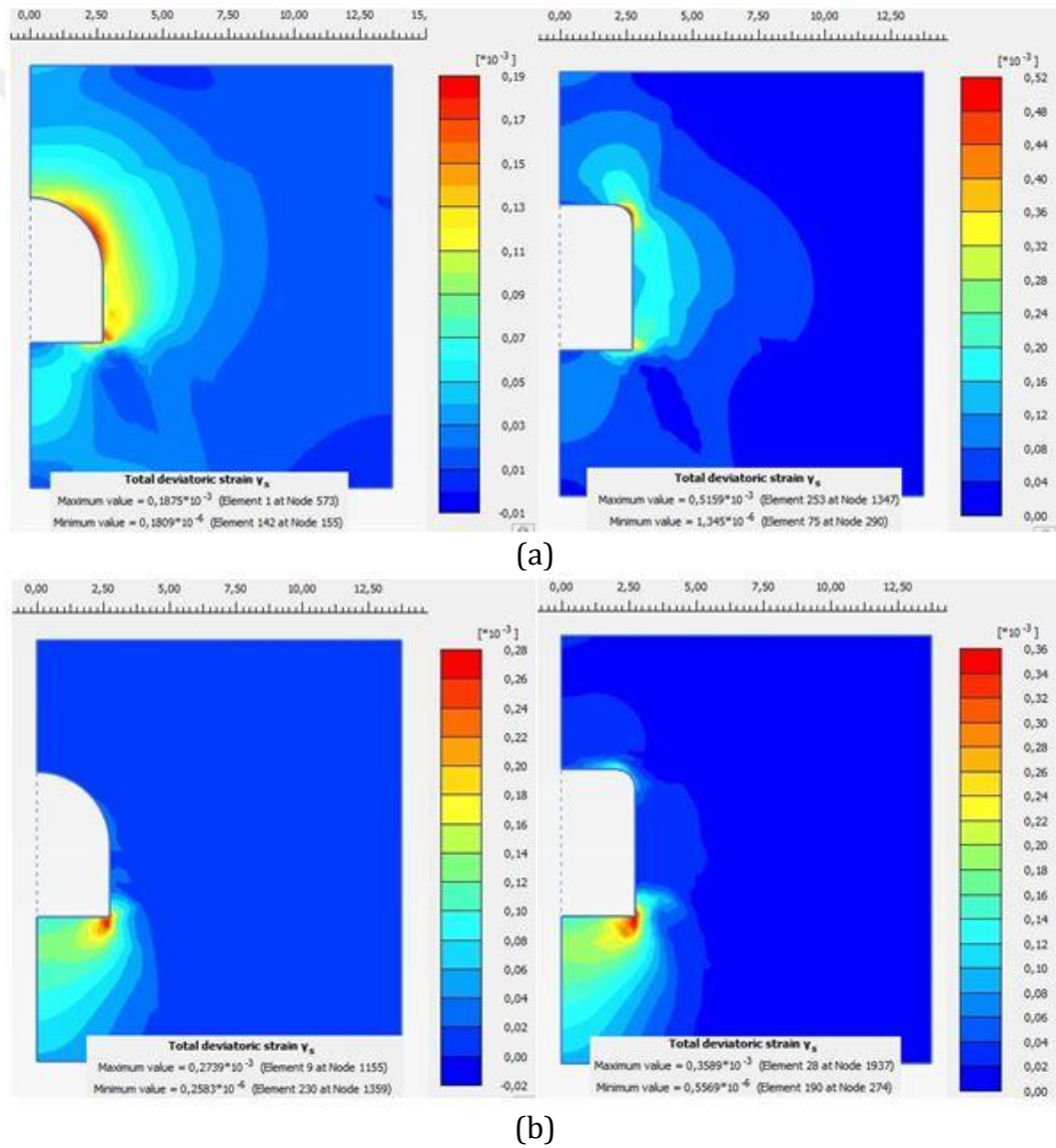
Yapılan duyarlılık analizi sonucunda çekme gerilmesi ve kohezyon değerlerinin incelenen durumlar üzerinde belirli bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Etken değerler kullanılarak parametre analizi yapılmış ve analizler sonucunda elde edilen yer değiştirme sonuçları Şekil 5.21’de gösterilmiştir.



Şekil 5.21 (a)Minimum, (b) maksimum durumda elde edilen toplam yer değiştirme dağılımları

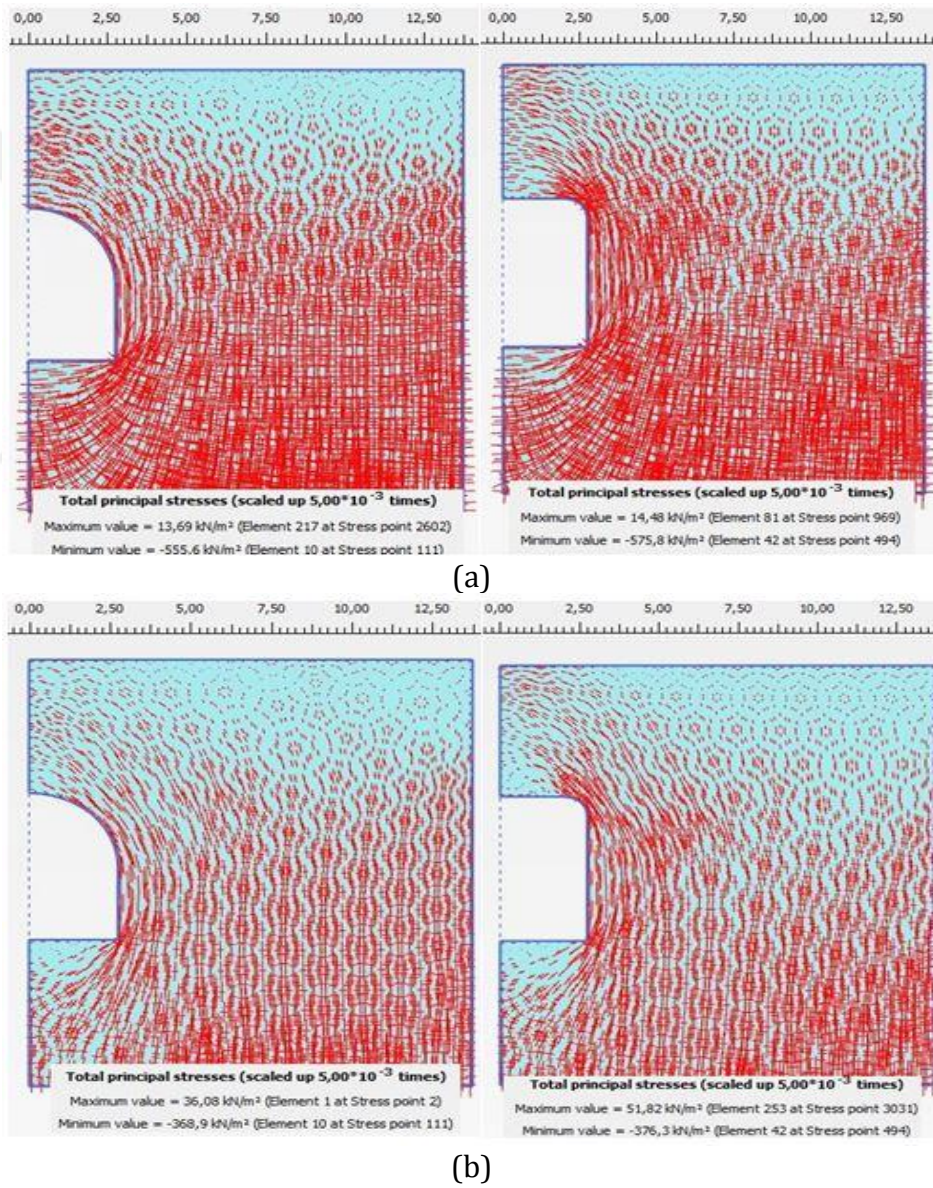
Minimum durum, tüm kombinasyonların çözümü sırasında elde edilen en küçük yer değiştirme değerini, maksimum durum ise en büyük yer değiştirme değerini ifade etmektedir. Şekil 5.21’de görüldüğü gibi maksimum ve minimum durumda meydana gelen yer değiştirmeler oyma yapının farklı bölgelerinde oluşmuştur. Minimum durumda oyma yapı taç kısmında ve yan yüzeylerinde oturma olarak meydana gelen yer değiştirmeler, maksimum durumda tabanda kabarma olarak meydana gelmiştir.

Parametre analizi sonucunda değişimi incelenen diğer bir durum olan kayma şekil değişimi dağılımları Şekil 5.22’de gösterilmiştir.



Şekil 5.22 (a)Minimum, (b) maksimum durumda elde edilen toplam kayma şekil değiştirmesi dağılımları

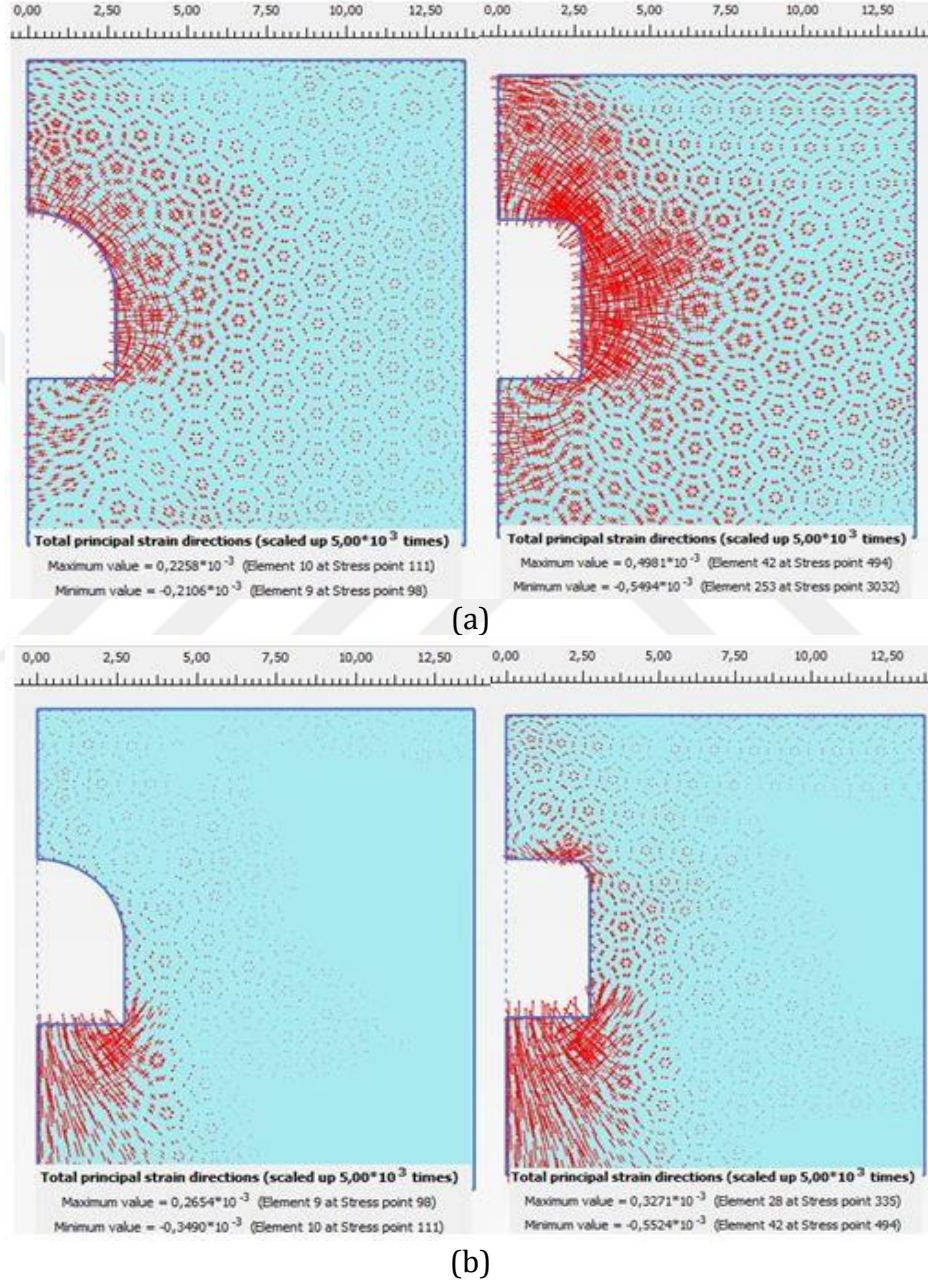
Şekil 5.22 incelendiğinde minimum durumda en büyük kayma şekil değiştirmelerinin oyma yapı taban köşe noktasında meydana geldiği ve yan yüzeylere doğru dağılım gösterdiği görülmektedir. Maksimum durumda ise en büyük kayma şekil değiştirmesi taban köşe noktasında oluşup, oyma yapı alt kısmına doğru dağılım göstermektedir. Parametre analizi sonucunda elde edilen toplam asal gerilme dağılımları Şekil 5.23’de gösterilmiştir. Şekil 5.23 incelendiğinde her iki durumda da asal gerilmelerin, kemer tavanlı oyma yapıda taban köşe noktalarda yoğunlaştığı, düzlem tavanlı oyma yapıda ise taban köşe noktalarına ek olarak üst köşe noktalarda da yoğunlaştığı görülmektedir.



Şekil 5.23 (a)Minimum, (b) maksimum durumda elde edilen toplam asal gerilme dağılımları (lineer elastik bünye modeli)

Parametre analizi sonucunda asal gerilmelerde belirlenen diğer bir sonuç minimum durumda oluşan basınç gerilme değerlerinin, maksimum durumda oluşan basınç gerilme değerlerinden daha yüksek olduğudur.

Analizler sonucunda maksimum ve minimum durum için elde edilen toplam asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 5.24’de gösterilmiştir.



Şekil 5.24 (a)Minimum, (b) maksimum durumda elde edilen toplam asal şekil değiştirme dağılımları (lineer elastik bünye modeli)

Şekil 5.24 incelendiğinde, minimum durumda asal şekil değiştirmelerin kemer tavanlı oyma yapıda taban ve köşelerde düzgün dağılım gösterdiği, düzlem tavanlı oyma yapıda taban köşe noktasında ve yan yüzeylerde yoğunlaştığı görülmektedir. Maksimum durum için ise asal şekil değiştirmelerin her iki oyma yapı türünde de tabanda yoğunlaştığı görülmektedir.

5.4.2 Hoek-Brown Bünye Modeli ile Duyarlılık ve Parametre Analizi

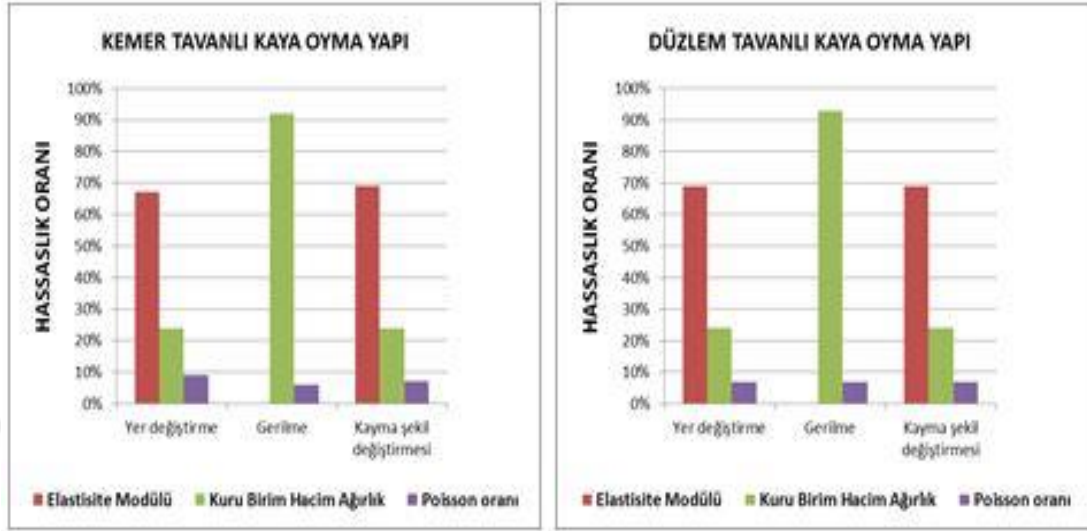
Kaya ortamını modellemede yaygın olarak tercih edilen Hoek-Brown bünye modelinde kaya kütle özelliklerine ait parametreler kullanılmaktadır. Kayanın jeolojik dayanım indeksi (GSI), kaya kütle katsayısı (m_i), örselenme faktörü (D) ve tek eksenli basınç dayanım (σ_{ci}) değerleri dikkate alınarak ortama ait elastisite modülü ve kayma mukavemeti parametreleri belirlenir. İdeal plastik bünye modelinden farklı olarak kırılma zarfını lineer olarak dikkate almamakta ve gerçek davranışa yakın bir durumu modellemektedir. Bu sebepten dolayı Hoek-Brown bünye modeli ile de duyarlılık ve parametre analizi yapılmış, analizler de kullanılan parametre değer aralıkları Tablo 5.15’de gösterilmiştir.

Tablo 5.15 Hoek-Brown bünye modeli duyarlılık analizi parametre değerleri

Katsayı	Sembol	Birim	Minimum	Referans	Maksimum
Kuru birim hacim ağırlık	γ_k	kN/m ³	12	14	16
Elastisite Modülü	E_{rm}	MPa	550	700	1500
Poisson oranı	ν	-	0,2	0,25	0,3
Tek eksenli basınç dayanımı	σ_{ci}	MPa	4,0	5,0	6,0
Kaya kütle katsayısı	m_i	-	8	13	18
Jeolojik dayanım indeksi	GSI	-	60	60	80
Örselenme faktörü	D	-	0	0	0,2

Tablo 5.15’de verilen değerler kullanılarak yapılan duyarlılık analizi sonucunda yer değiştirme, kayma şekil değiştirmesi ve gerilmeler üzerinde belirlenen etken parametre yüzdeleri Şekil 5.25’de gösterilmiştir. Şekil 5.25 incelendiğinde yer değiştirme ve kayma şekil değiştirmesi üzerinde elastisite modülü değerinin büyük oranda etkili olduğu ve oyma yapı şekline bağlı olarak bu etken yüzdesinin farklı olduğu görülmektedir. Gerilmeler üzerinde ise birim hacim ağırlık değerinin daha etken olduğu grafik üzerinde görülmektedir. Yapılan duyarlılık analizi sonucunda

Hoek-Brown model parametre değerlerinin yüzde beşlik dilim üzerinde etken olmadığı sonucu ortaya çıksa da bu değerlerin kaya ortamının davranışını belirlemede önemli oldukları Hoek-Brown analiz sonuçları ile gösterilmiştir.

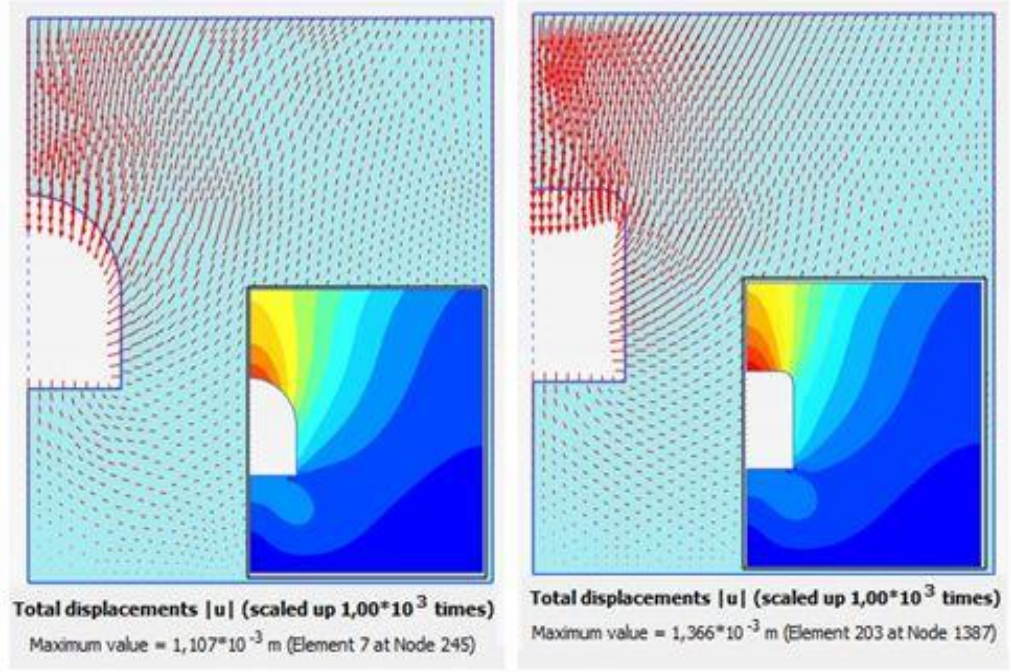


Şekil 5.25 Hoek-Brown bünye modeli için sensitivite analizi ile elde edilen etken parametre yüzdeleri

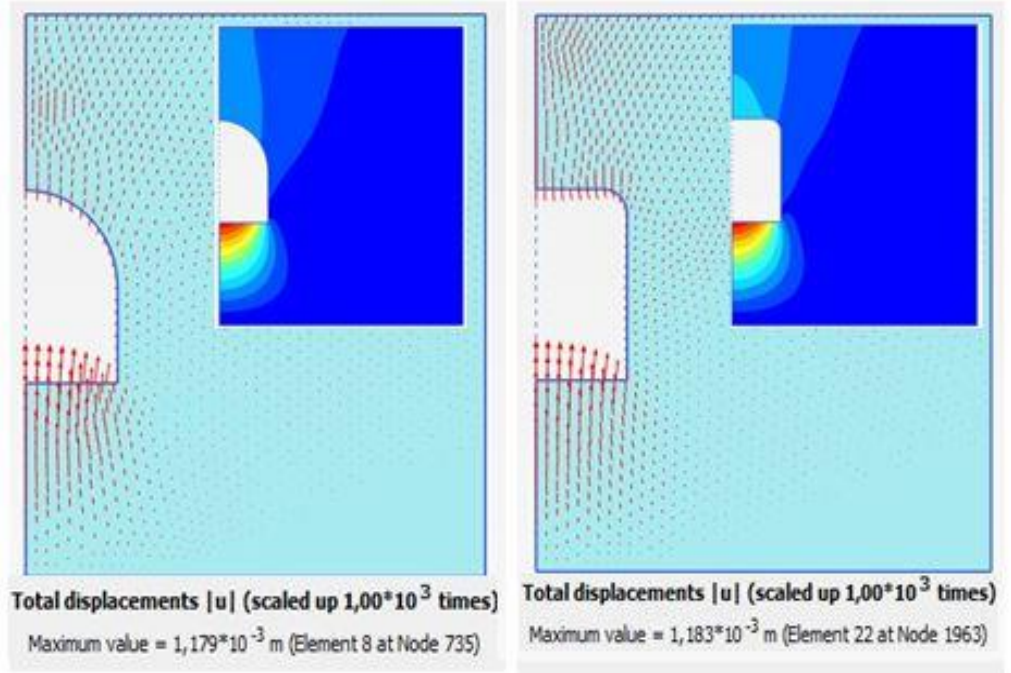
Yapılan sensitivite analizi sonrasında değişimi incelenen yer değiştirme, kayma şekil değiştirmesi ve gerilmeler üzerinde etken olan elastisite modülü, birim hacim ağırlık ve poisson oranı değerleri kullanılarak parametre analizi yapılmıştır. Yapılan parametre analizi sonucunda elde edilen maksimum ve minimum yer değiştirme sonuçları Şekil 5.26’da gösterilmiştir. Şekil 5.26 incelendiğinde minimum durumda taç ve yan yüzeylerde oturma, maksimum durumda tabanda kabarma meydana geldiği görülmektedir. Sonuçların ideal plastik bünye modeli ile yapılan parametre analizi ile benzer olması, yer değiştirmelerin ortam rijitliğine (elastisite modülü) bağlı olduğunu ve rijitliğin artması ile de kabarma şeklinde yer değiştirme sorunları oluşabileceğini göstermektedir.

Hoek-Brown bünye modeli ile parametre analizinde değişimi incelenen kayma şekil değiştirmesi dağılımı sonuçları Şekil 5.27’de gösterilmiştir. Şekil 5.27’e bakıldığında sonuçlar minimum durumda en büyük kayma şekil değiştirmesinin kemer tavanlı oyma yapıda, tabanda meydana geldiğini ve gelen yük artışına bağlı olarak oyma yapı yan yüzeylerinde de oluşabileceğini göstermektedir. Düzlem tavanlı oyma yapı içinse minimum durumda en büyük kayma şekil değiştirmesinin

üst köşe noktada meydana geldiği ve yük artışı ile yan yüzeylerde de meydana gelebileceği görülmüştür. Maksimum durumda her iki oyma yapı şekli içinde, en büyük kayma şekil değiştirmelerinin tabanda oluşabileceği görülmektedir.

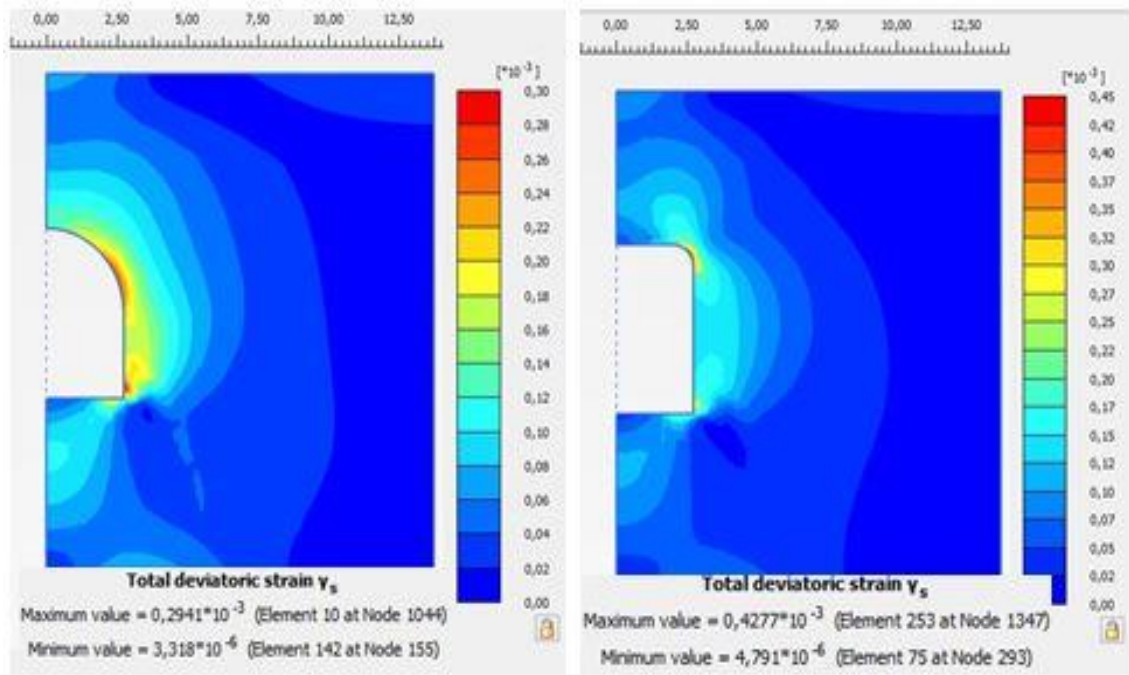


(a)

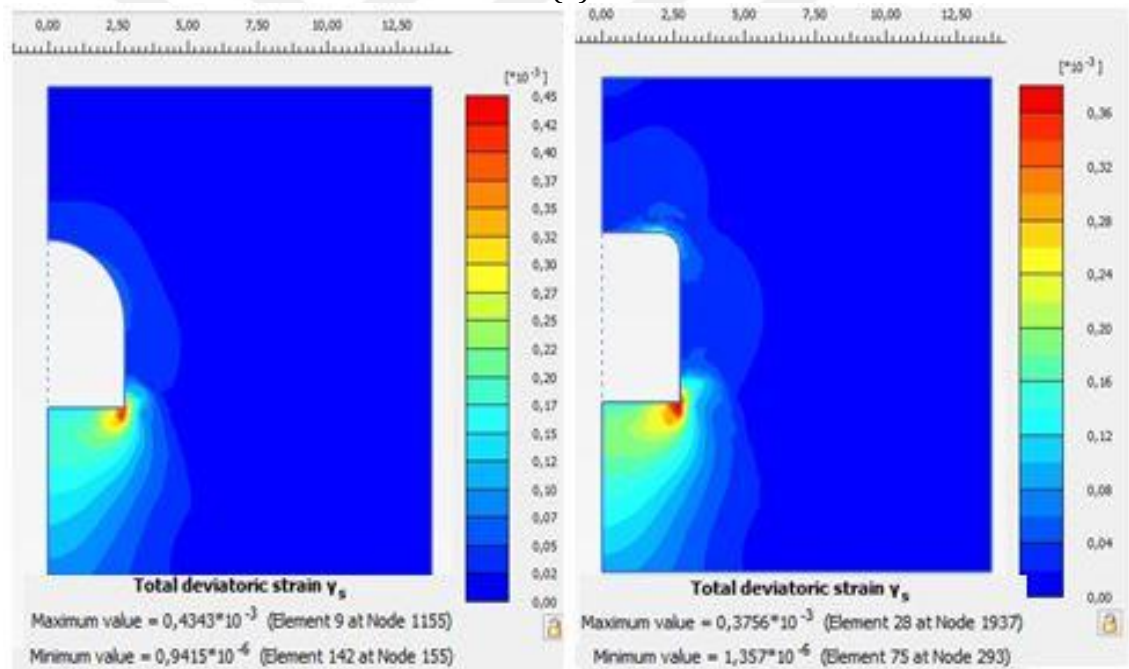


(b)

Şekil 5.26 (a) Minimum, (b) maksimum durumda elde edilen toplam yer değiştirme dağılımları



(a)

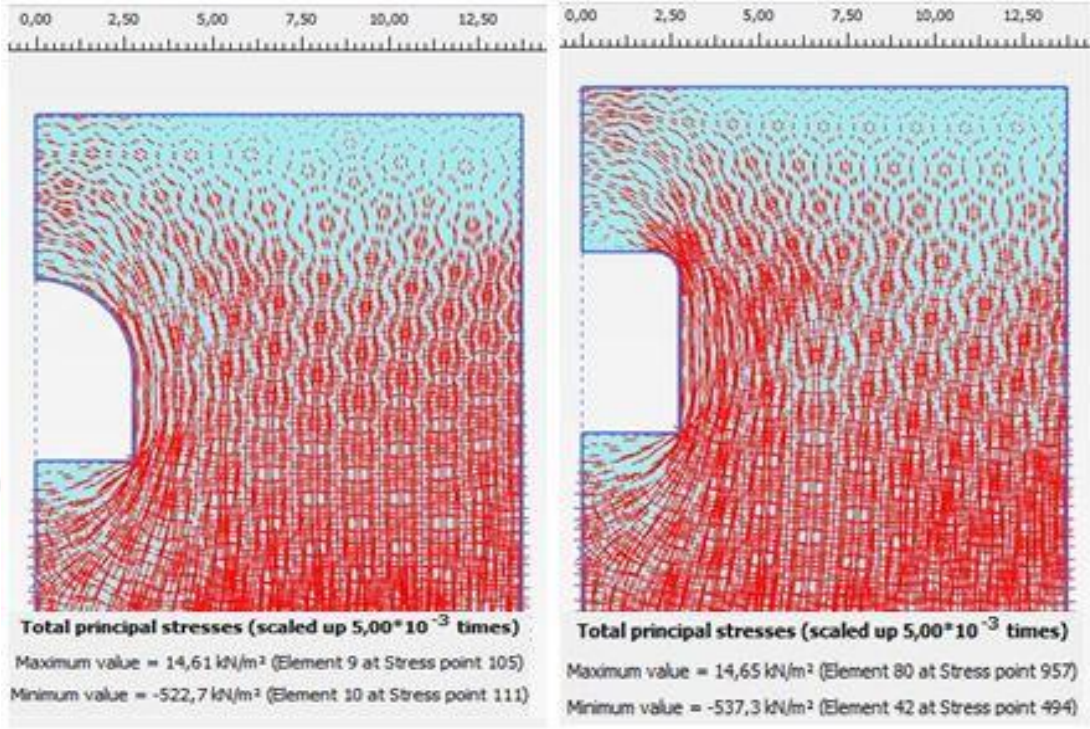


(b)

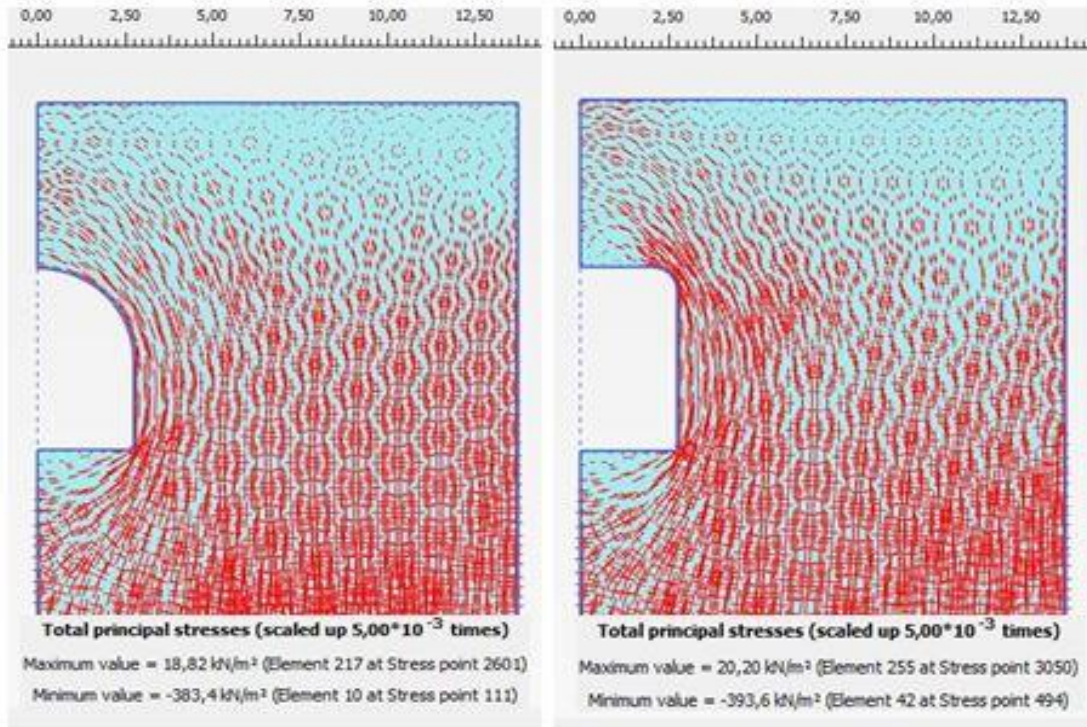
Şekil 5.27 (a)Minimum, (b) maksimum durumda elde edilen toplam kayma şekil değiştirmesi dağılımları

Analizler sonucunda elde edilen toplam asal gerilme dağılımları Şekil 5.28’de, toplam asal şekil değiştirme dağılımları Şekil 5.29’da gösterilmiştir. Şekil 5.28 incelendiğinde minimum durumda, maksimum duruma göre daha küçük asal gerilmelerin olduğu görülmektedir. Asal gerilmeler kemer tavanlı oyma yapıda

taban köşe noktasında yoğunlaşırken, düzlem tavanlı oyma yapıda alt ve üst köşelerde yoğunlaşmaktadır.

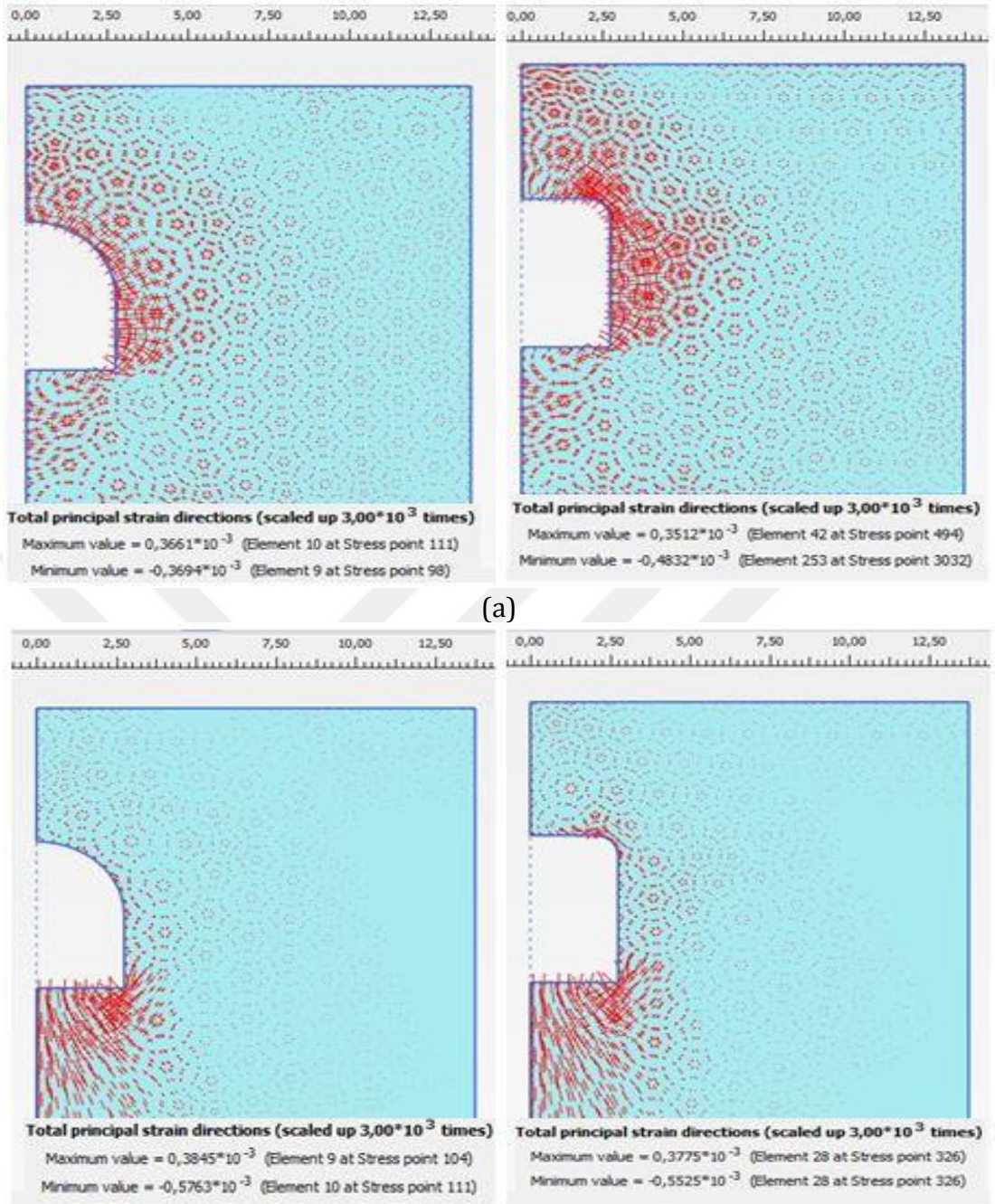


(a)



(b)

Şekil 5.28 (a)Minimum, (b) maksimum durumda elde edilen toplam asal gerilme dağılımları



Şekil 5.29 (a)Minimum, (b) maksimum durumda elde edilen toplam asal şekil değiştirme dağılımları

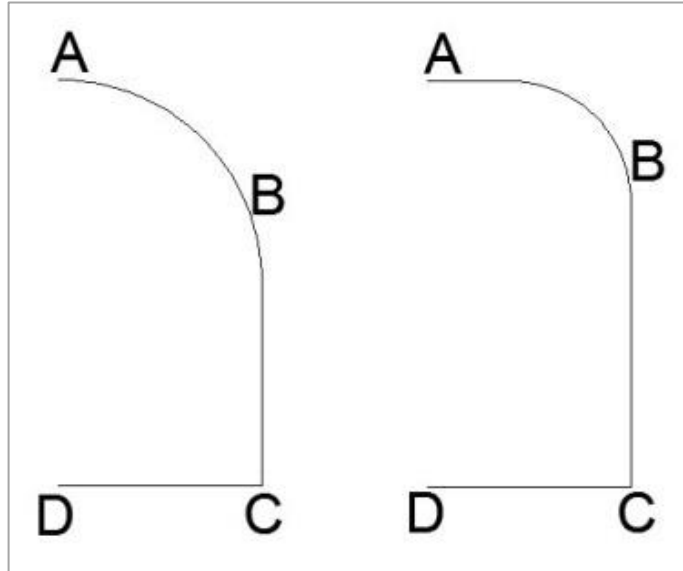
Asal şekil değiştirmelerin verildiği Şekil 5.29 incelendiğinde maksimum ve minimum durumun davranışsal olarak farklı olduğu görülmektedir. Ortam rijitliğinin düşük olduğu minimum durumda oyma yapı tavan ve yan yüzeylerinde şekil değiştirmeler yoğunlaşırken, ortam rijitliğinin yüksek olduğu maksimum durumda oyma yapı taban kısmında yoğunlaşmaktadır.

ANALİZ SONUÇLARINA GÖRE GERİLME DEĞERİ DEĞİŞİMİ

6.1 Giriş

Birim alana etkiyen yük olarak tanımlanan gerilme, oyma yapı davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Örtü yükü, oyma yapı şekli ve yüksekliğine bağlı olarak artan gerilme değerleri oyma yapı etrafında plastik şekil değiştirmelerin oluşmasına ve göçme meydana gelmesine sebep olabilmektedir. Bu durum da yapılan incelemelerde gerilme değerleri değişimin de incelenmesi sonucunu ortaya çıkartmaktadır.

Tezin bu bölümünde, lineer elastik, ideal plastik ve Hoek-Brown bünye modelleri kullanılarak yapılan analizler sonucunda elde edilen yatay, düşey ve deviator gerilme değerlerinin değişimi incelenmiştir. İncelemelerde önceki bölümlerde yapılan analiz sonuçları göz önünde bulundurularak Şekil 6.1’de gösterilen noktalar seçilmiştir.



Şekil 6.1 Oyma yapı etrafında seçilen kritik noktalar

Şekil 6.1’de seçilen A ve D noktası en büyük yer değiştirmelerin oluşabileceği taç ve taban orta noktasını, B ve C noktaları ise en büyük şekil değiştirmelerin ve asal gerilmelerin oluşabileceği köşe noktaları ifade etmektedir.

6.2 Örtü Yüküne Bağlı Gerilme Değerlerinin Değişimi

Oyma yapı davranışını belirleyen en önemli parametrelerden biri de örtü yükü değeridir. Lineer elastik, ideal plastik ve Hoek-Brown bünye modelleri ile yapılan analiz sonuçları, artan örtü yükü değeri ile birlikte oyma yapı etrafında meydana gelen gerilme değerlerinin arttığını göstermiştir. Oyma yapı etrafında seçilen kritik noktalarda (Şekil 6.1) gerilme değerlerinin değişimi tüm bünye modelleri için incelendiğinde, ortamdaki yanal gerilmelerin tüm noktalarda azaldığı görülmüştür. Düşey gerilmelerin ise tüm bünye modellerinde taç ve taban kısmında azaldığı, yan yüzeylerde seçilen noktalarda arttığı gözlenmiştir. İdeal plastik bünye modelinde düzlem tavanlı oyma yapının da Lineer Elastik ve Hoek-Brown bünye modelleri ile benzer sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Lineer elastik ve Hoek-Brown bünye modellerinde düşey gerilmelerin taç kısmında azalması, oyma yapılar yönetmeliği 2007’de belirtilen “Kayadan oyma yapılar için örtü kalınlığı, kayadan oyma yapının tavanında oluşan normal gerilmelerin yan duvarlara aktarılmasını sağlayacak ve kendi kendini taşıyabilecek kalınlıkta tasarlanır” ilkesini desteklemektedir. Seçilen noktalara göre gerilme değerlerine ait bilgiler bünye modellerine göre Ek A, Ek B ve Ek C’de verilmiştir.

Oyma yapı etrafında örtü yükü ile birlikte değişimine bakılan diğer bir durum oluşan maksimum ve minimum gerilmelerdir. Lineer elastik bünye modeli için maksimum ve minimum gerilme değerleri Tablo 6.1’de verilmiştir. Tablo 6.1 incelendiğinde oyma yapı etrafında düşey çekme gerilmelerinin oluşmadığı, çok küçük değerlerde yanal çekme gerilmelerinin oluştuğu görülmektedir. Her iki oyma yapı türü içinde düşey basınç gerilmelerinin daha büyük olduğu görülmektedir. Örtü yükünün artması ile düşey ve yanal gerilme değerlerinin arttığı da Tablo 6.1’de görülmektedir.

İdeal plastik bünye modeli sonucunda elde edilen maksimum ve minimum gerilme değerleri Tablo 6.2’de verilmiştir. Tablo 6.2 incelendiğinde sonuçların lineer

elastik analiz sonuçlarına göre biraz daha büyük değerler ile benzer sonuç verdiği görülmektedir.

Tablo 6.1 Lineer elastik analizler sonucunda elde edilen düşey ve yanal gerilme değerleri

Model	Örtü kalınlığı (m)	σ_1 (kN/m ²)		σ_3 (kN/m ²)	
		Maksimum	Minimum	Maksimum	Minimum
Kemer tavanlı	5,0	0,05	-408,6	17,1	-123,3
	15,0	0,03	-864,8	17,34	-220,0
	30,0	0	-1095	14,94	-336,9
Düzlem tavanlı	5,0	0,09	-415,9	19,16	-126,3
	15,0	0,03	-757,6	35,15	-238,9
	30,0	0	-1367	29,63	-326,4
Gerilmelerde (+) çekme gerilmesini, (-) basınç gerilmesini ifade etmektedir. σ_1 düşey gerilme değerini, σ_3 yanal gerilme değerini ifade etmektedir.					

Tablo 6.2 İdeal plastik analizler sonucunda elde edilen düşey ve yanal gerilme değerleri

Model	Örtü kalınlığı (m)	σ_1 (kN/m ²)		σ_3 (kN/m ²)	
		Maksimum	Minimum	Maksimum	Minimum
Kemer tavanlı	5,0	0,03	-422,6	17,32	-131,3
	15,0	0,02	-889,4	17,52	-233,7
	30,0	0	-1123	15,25	-356,9
Düzlem tavanlı	5,0	0,09	-429,5	19,34	-133,9
	15,0	0,03	-792,9	37,39	-252,7
	30,0	0	-1666	74,61	-399,3
Gerilmelerde (+) çekme gerilmesini, (-) basınç gerilmesini ifade etmektedir. σ_1 düşey gerilme değerini, σ_3 yanal gerilme değerini ifade etmektedir.					

Hoek-Brown bünye modeli sonucunda elde edilen maksimum ve minimum gerilme değerleri Tablo 6.3'de verilmiştir. Tablo 6.3 incelendiğinde örtü yükü değerinin artması diğer iki bünye modelinde olduğu gibi, Hoek-Brown bünye modelinde de oyma yapı etrafında meydana gelen düşey ve yanal basınç gerilme değerlerini arttırmıştır. Ortamda düşey çekme gerilmeleri oluşmadığı, fakat yanal çekme gerilmeleri olduğu görülmektedir. Kazı sonrasında oyma yapı etrafında oluşan düşey basınç gerilme değerlerinin, yanal basınç gerilme değerlerinden daha büyük

olduğu belirlenmiştir. Düzlem tavanlı oyma yapıda oluşan gerilme büyüklüklerin, kemer tavanlı oyma yapıya göre daha büyük olduğu da analizler sonucunda görülmüştür.

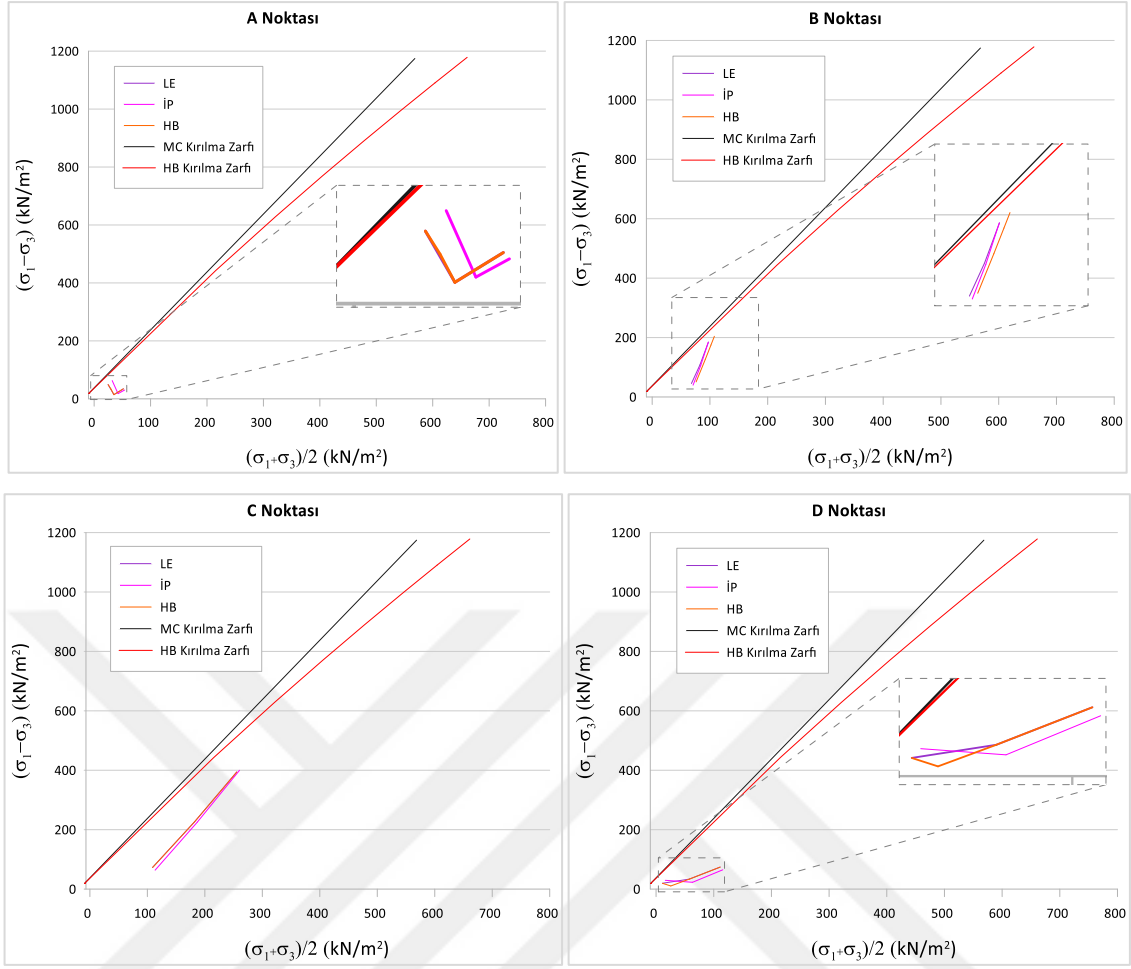
Tablo 6.3 Hoek-Brown analizleri sonucunda elde edilen düşey ve yanal gerilme değerleri

Model	Örtü kalınlığı (m)	σ_1 (kN/m ²)		σ_3 (kN/m ²)	
		Maksimum	Minimum	Maksimum	Minimum
Kemer tavanlı	5,0	0,05	-408,5	17,1	-122,9
	15,0	0,03	-863	18,6	-212,5
	30,0	0	-1077	14,89	-330,5
Düzlem tavanlı	5,0	0,09	-415,9	19,16	-126,3
	15,0	0,03	-754,2	35,13	-233,6
	30,0	0	-1337	28,81	-321,9
Gerilmelerde (+) çekme gerilmesini, (-) basınç gerilmesini ifade etmektedir. σ_1 düşey gerilme değerini, σ_3 yanal gerilme değerini ifade etmektedir.					

Maksimum ve minimum gerilmeler bünye modelleri için değerlendirildiğinde Hoek-Brown bünye modeli sonucunda elde edilen gerilme değerlerinin Lineer Elastik bünye modeli ile yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. İdeal plastik bünye modeli sonucunda elde edilen düşey ve yatay basınç gerilme değerleri diğer bünye modellerine göre daha büyük sonuçlar vermiştir.

6.3 Kaya Oyma Yapılarda Gerilme İzleri

Analizlerin bu kısmında Şekil 6.1’de verilen noktalar için ortalama ve deviatör gerilmeler dikkate alınarak gerilme izlerinin grafikleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu gerilme izi grafiklerinde Mohr-Coulomb ve Hoek-Brown için kırılma zarfları Roclab 1.0 (Rocscience) yazılımı kullanılarak belirlenmiştir. Her iki oyma yapı türü için ayrı ayrı verilen grafikler tüm örtü yükseklikleri için değerlendirilmiştir. Örtü kalınlığının 5 m olması durumunda kemer tavanlı oyma için elde edilen grafikler Şekil 6.2’de gösterilmiş, gerilme değerlerinin değişimi Tablo 6.4’de verilmiştir.



Şekil 6.2 Kemer tavanlı oyma yapı için gerilme izleri (e=5,0 m)

Tablo 6.4 Kemer tavanlı oyma yapı kritik durum gerilme değerleri (e=5,0 m)

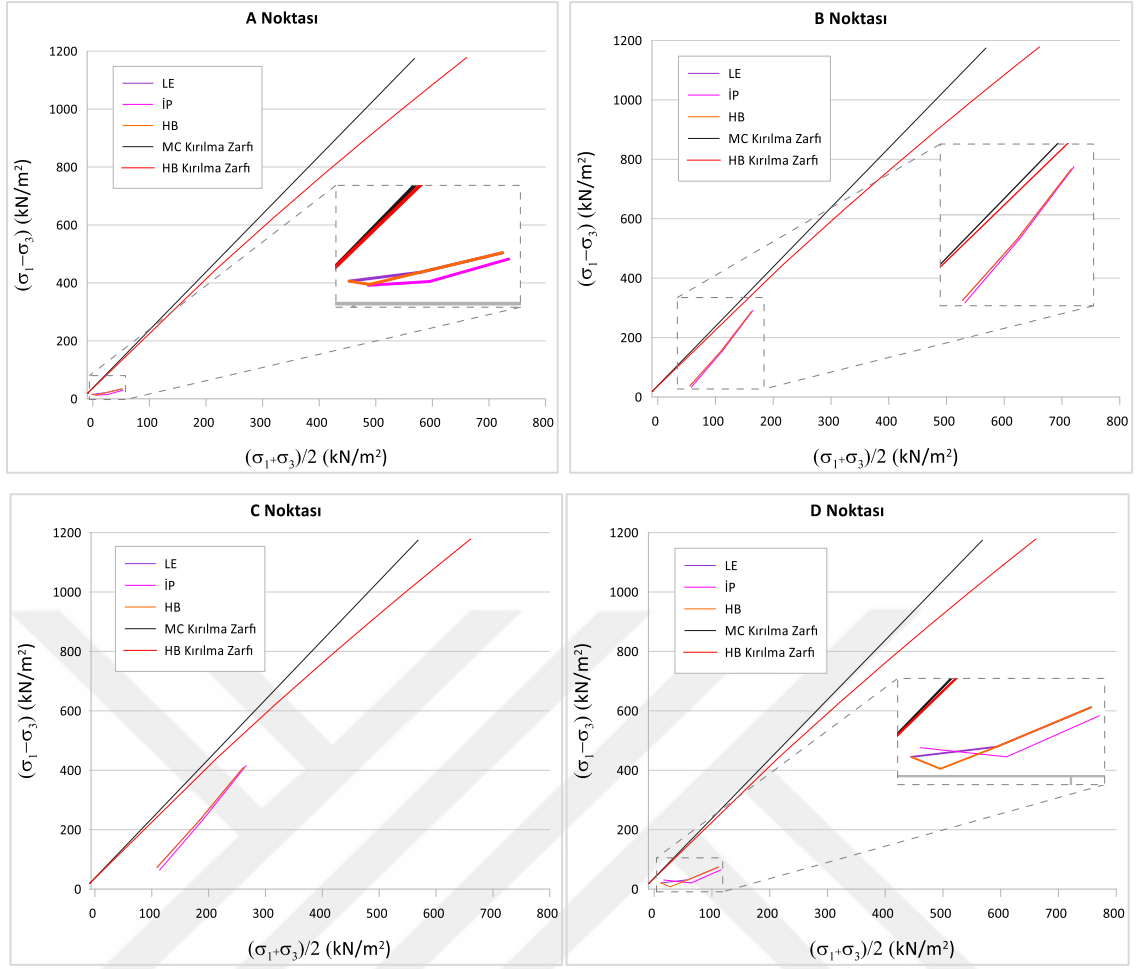
Nokta	Model	Başlangıç (kN/m²)		Son (kN/m²)	
		$(\sigma_1 + \sigma_3)/2$	$(\sigma_1 - \sigma_3)$	$(\sigma_1 + \sigma_3)/2$	$(\sigma_1 - \sigma_3)$
A	LE	51,86	34,57	24,77	49,11
	İP	53,99	30,31	32,01	62,94
	HB	51,86	34,57	24,77	49,11
B	LE	67,96	45,30	97,41	184,84
	İP	70,75	39,72	97,21	184,46
	HB	76,08	50,72	107,68	204,21
C	LE	108,99	72,66	255,61	394,27
	İP	113,47	63,71	260,34	399,98
	HB	108,99	72,66	255,53	394,19
D	LE	111,16	74,11	11,00	19,59
	İP	115,73	64,97	15,99	29,56
	HB	111,16	74,11	11,00	19,58

Şekil 6.2 incelendiğinde tüm noktalarda lineer elastik ve Hoek-Brown gerilme izlerinin benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Oyma yapı taç noktasında (A noktası) ortalama gerilmenin azaldığı, deviatör gerilmenin ise kemer tavanlı oyma yapıda arttığı, düzlem tavanlı oyma yapıda ise azaldığı görülmektedir. Oyma yapı taban orta noktasında da tüm bünye modelleri için ortalama ve deviatör gerilmenin azaldığı gözlenmiştir. Gerilme ve kayma şekil değiştirmeleri bakımından kritik olan B ve C noktalarında ise tüm bünye modellerinde ortalama ve deviatör gerilme değerlerinin arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Benzer sonuçlar örtü kalınlığının 5 m olması durumu için Şekil 6.3 ve Tablo 6.5’de verilen düzlem tavanlı oyma yapı davranışı içinde geçerlidir. Taban ve taç orta noktalarında ortalama ve deviatör gerilme azalırken, köşe noktalarda ortalama ve deviatör gerilmenin arttığı sonucu elde edilmiştir. Minimum örtü kalınlığı altında her iki oyma yapı da belirlenen noktaların yenilme zarfını aşmadığı ve göçme oluşmadığı sonucuna varılmıştır.

Örtü kalınlığının 15 m olması durumunda kemer tavanlı oyma yapı için elde edilen grafikler Şekil 6.4’de, düzlem tavanlı oyma yapı için elde edilen grafikler Şekil 6.5’de, gerilme değerleri de Tablo 6.6 ve Tablo 6.7’de verilmiştir. Her iki oyma yapı türünde de örtü kalınlığının artması oluşan gerilme büyüklüklerini arttırmış fakat seçilen herhangi bir noktada kırılma zarfı aşılmamıştır. Oyma yapı kenar noktalarında ortalama ve deviatör gerilme değerlerinin arttığı, taban orta noktalarında gerilme boşalması ile deviatör gerilmelerin azaldığı görülmüştür. Taç orta noktasında her iki tip oyma yapıda da ortalama gerilmenin azaldığı, deviatör gerilmenin ise kemer tavanlı oyma yapıda arttığı, düzlem tavanlı oyma yapıda ise azaldığı görülmüştür.

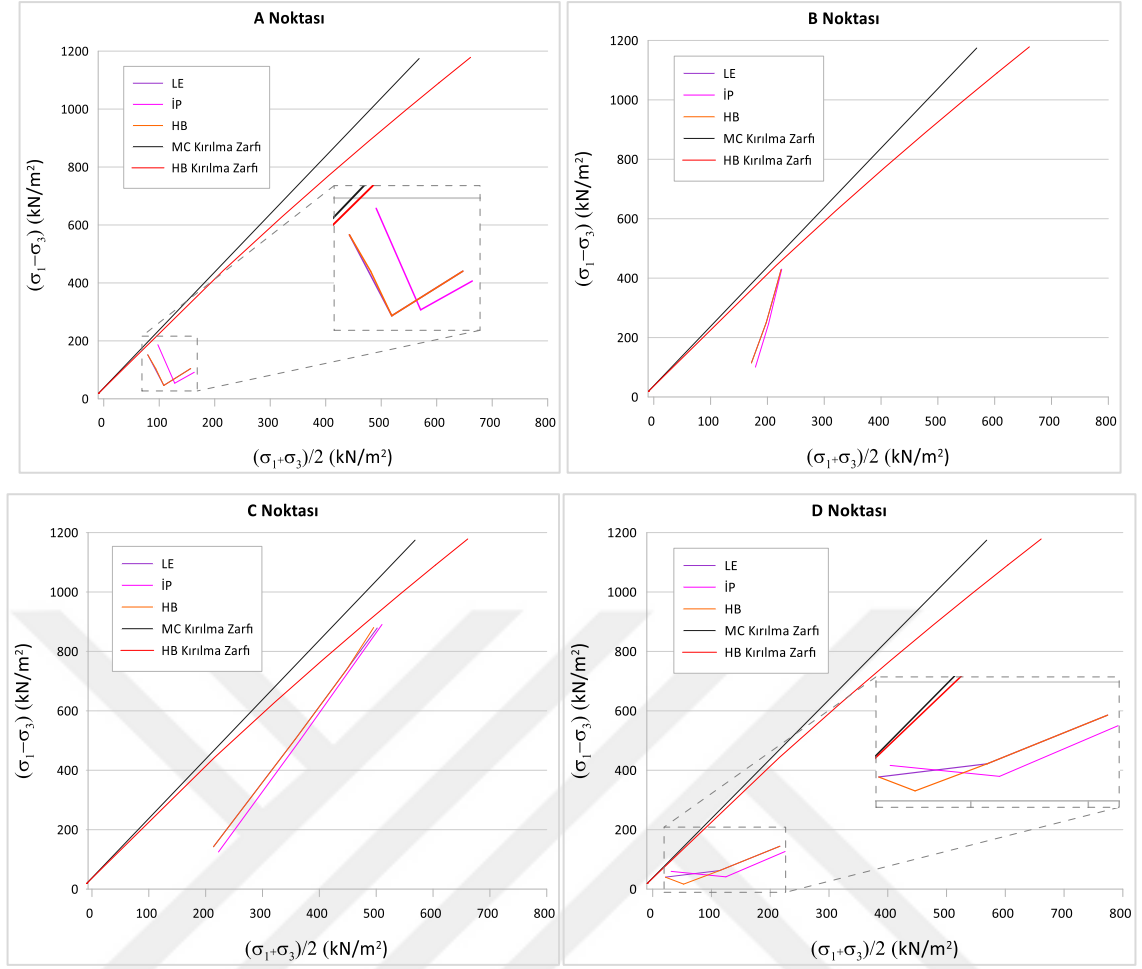
Örtü kalınlığının 30 m olması durumunda da gerilme büyüklükleri artmış, tüm bünye modellerinde gerilmelerin kırılma zarfına çok yaklaştığı fakat aşılmadığı görülmektedir (Şekil 6.6, Şekil 6.7). Analizler sonucunda yüksek örtü kalınlığında oluşan plastik noktalar bu sonucu doğrulamaktadır.



Şekil 6.3 Düzlem tavanlı oyma yapı için gerilme izleri (e=5,0 m)

Tablo 6.5 Düzlem tavanlı oyma yapı kritik durum gerilme değerleri (e=5,0 m)

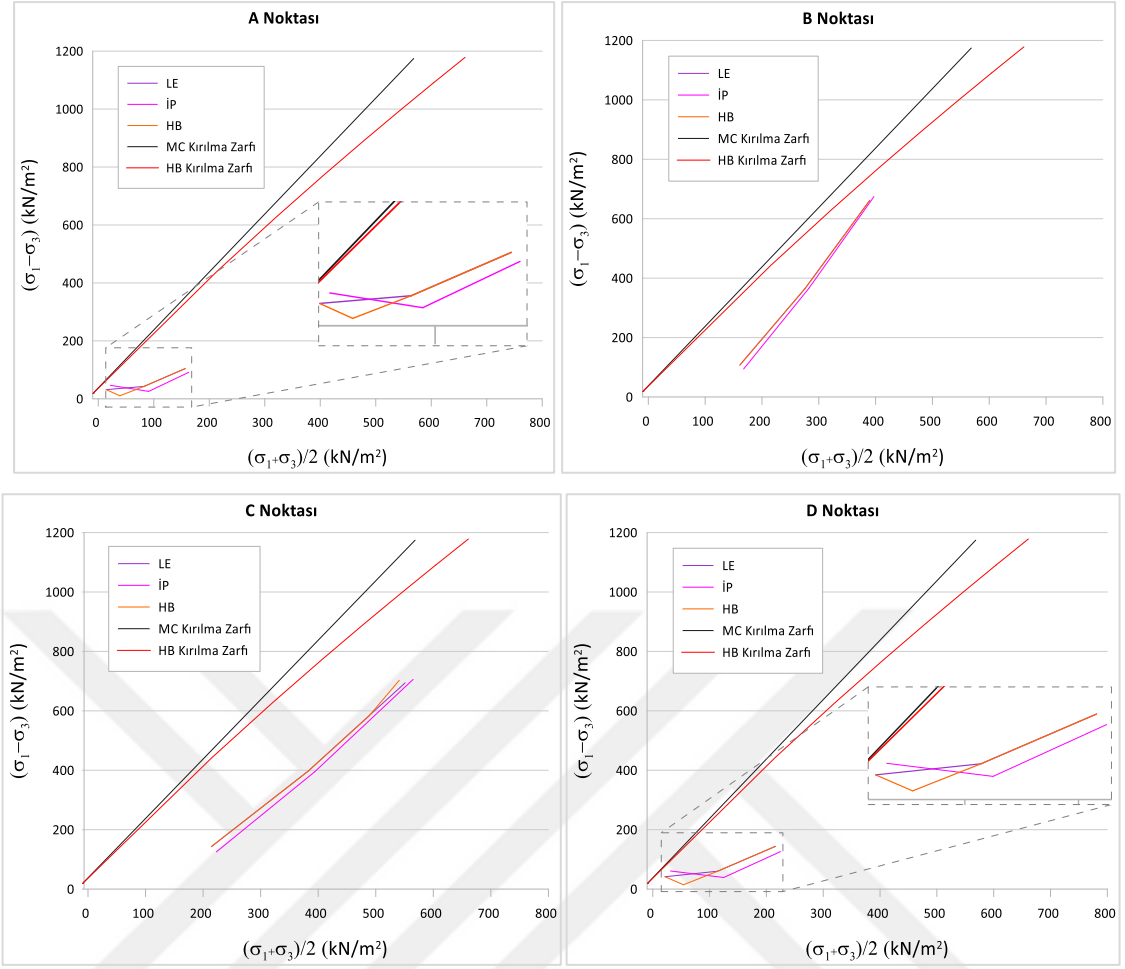
Nokta	Model	Başlangıç (kN/m^2)		Son (kN/m^2)	
		$(\sigma_1 + \sigma_3)/2$	$(\sigma_1 - \sigma_3)$	$(\sigma_1 + \sigma_3)/2$	$(\sigma_1 - \sigma_3)$
A	LE	51,67	34,45	-1,56	15,21
	İP	53,79	30,20	5,11	12,42
	HB	51,67	34,45	-1,56	15,21
B	LE	55,84	37,23	162,36	287,07
	İP	58,13	32,64	164,85	291,50
	HB	55,84	37,23	162,36	287,07
C	LE	109,06	72,71	260,65	408,73
	İP	113,55	63,75	265,99	416,08
	HB	109,06	72,71	260,65	408,73
D	LE	111,16	74,11	11,54	20,66
	İP	115,73	64,97	16,53	30,64
	HB	111,16	74,11	11,54	20,66



Şekil 6.4 Kemer tavanlı oyma yapı kritik için gerilme izleri($e=15,0$ m)

Tablo 6.6 Kemer tavanlı oyma yapı kritik durum gerilme değerleri ($e=15,0$ m)

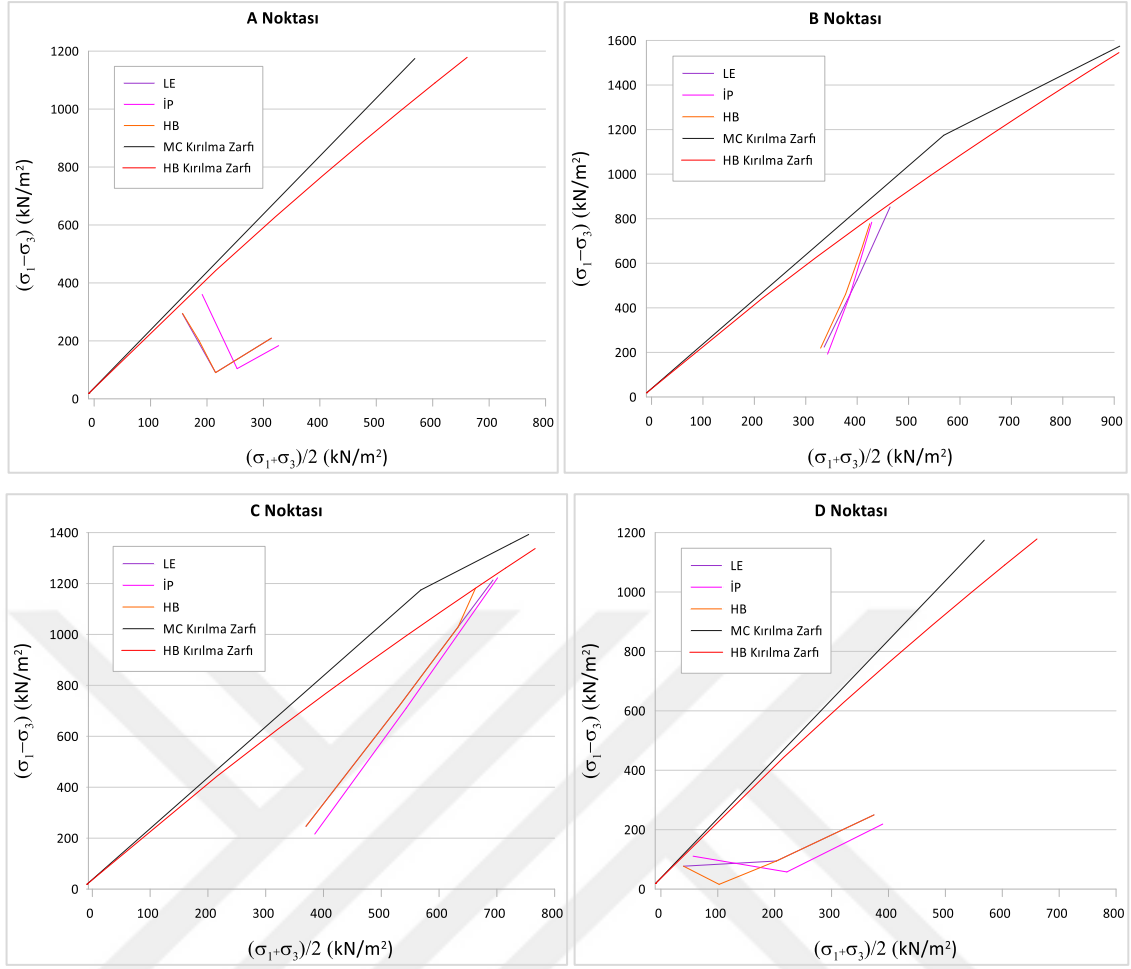
Nokta	Model	Başlangıç (kN/m ²)		Son (kN/m ²)	
		$(\sigma_1+\sigma_3)/2$	$(\sigma_1-\sigma_3)$	$(\sigma_1+\sigma_3)/2$	$(\sigma_1-\sigma_3)$
A	LE	156,75	104,50	79,28	152,04
	İP	163,19	91,62	97,56	186,66
	HB	156,75	104,50	79,30	152,07
B	LE	171,84	114,56	224,04	428,29
	İP	178,91	100,44	225,18	430,31
	HB	171,84	114,56	224,01	428,23
C	LE	213,77	142,51	501,80	878,75
	İP	222,55	124,95	510,23	890,61
	HB	213,77	142,51	495,60	880,48
D	LE	216,46	144,31	21,65	40,21
	İP	225,36	126,52	31,38	59,66
	HB	216,46	144,31	21,64	40,19



Şekil 6.5 Düzlem tavanlı oyma yapı için gerilme izleri (e=15,0 m)

Tablo 6.7 Düzlem tavanlı oyma yapı kritik durum gerilme değerleri (e=15,0 m)

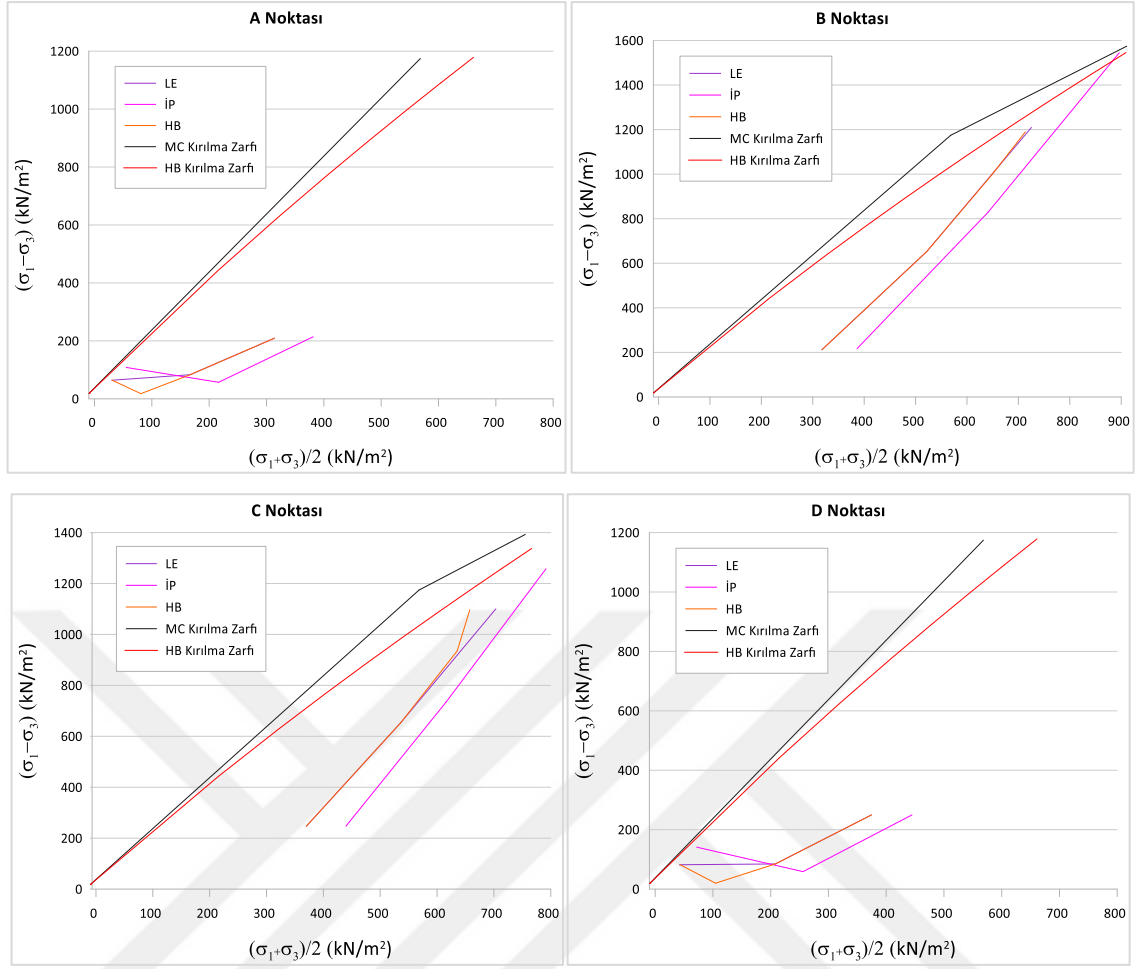
Nokta	Model	Başlangıç (kN/m^2)		Son (kN/m^2)	
		$(\sigma_1 + \sigma_3)/2$	$(\sigma_1 - \sigma_3)$	$(\sigma_1 + \sigma_3)/2$	$(\sigma_1 - \sigma_3)$
A	LE	156,67	104,45	14,20	31,72
	İP	163,11	91,57	21,70	46,66
	HB	156,67	104,45	14,21	31,74
B	LE	161,13	107,42	389,77	661,93
	İP	167,75	94,18	397,17	674,42
	HB	161,13	107,42	389,68	661,78
C	LE	214,24	142,83	551,15	694,32
	İP	223,05	125,22	564,90	705,75
	HB	214,24	142,83	540,85	702,65
D	LE	215,93	143,95	21,47	41,52
	İP	224,80	126,21	31,22	61,00
	HB	215,93	143,95	21,48	41,53



Şekil 6.6 Kemer tavanlı oyma yapı için gerilme izleri (e=30,0 m)

Tablo 6.8 Kemer tavanlı oyma yapı kritik durum gerilme değerleri (e=30,0 m)

Nokta	Model	Başlangıç (kN/m ²)		Son (kN/m ²)	
		($\sigma_1 + \sigma_3$)/2	($\sigma_1 - \sigma_3$)	($\sigma_1 + \sigma_3$)/2	($\sigma_1 - \sigma_3$)
A	LE	314,11	209,41	156,34	294,34
	İP	327,02	183,60	191,44	360,26
	HB	314,11	209,41	156,66	294,95
B	LE	335,72	223,81	463,99	852,59
	İP	342,39	192,23	428,37	784,31
	HB	328,88	219,25	424,49	777,66
C	LE	369,68	246,46	693,40	1213,65
	İP	384,87	216,08	701,31	1222,41
	HB	369,68	246,46	663,11	1181,68
D	LE	374,57	249,71	39,63	77,03
	İP	389,96	218,94	56,55	110,81
	HB	374,57	249,714	39,71	77,16



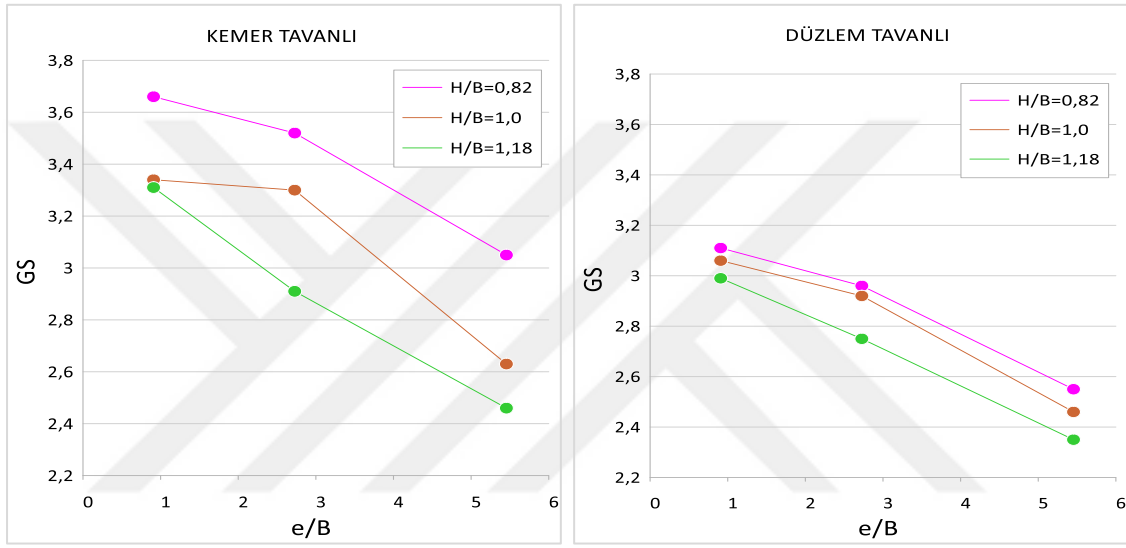
Şekil 6.7 Düzlem tavanlı oyma yapı için gerilme izleri (e=30,0 m)

Tablo 6.9 Düzlem tavanlı oyma yapı kritik durum gerilme değerleri (e=30,0 m)

Nokta	Model	Başlangıç (kN/m ²)		Son (kN/m ²)	
		$(\sigma_1 + \sigma_3)/2$	$(\sigma_1 - \sigma_3)$	$(\sigma_1 + \sigma_3)/2$	$(\sigma_1 - \sigma_3)$
A	LE	314,02	209,35	30,15	64,09
	İP	381,51	214,19	55,25	108,32
	HB	314,02	209,35	30,41	64,56
B	LE	317,79	211,86	725,44	1209,64
	İP	386,09	216,76	896,29	1544,91
	HB	317,79	211,86	713,45	1189,72
C	LE	369,97	246,65	703,44	1100,44
	İP	439,62	246,81	791,67	1257,90
	HB	369,97	246,65	657,62	1096,81
D	LE	374,57	249,71	42,18	81,96
	İP	444,62	249,62	71,89	141,23
	HB	374,57	249,71	42,59	82,71

5.4 Güvenlik Analizi Sonuçları (Incremental Displacement)

Yapılan araştırma kapsamında bu bölüme kadar sabit H/B oranı ile analizler yinelenmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Araştırmanın bu kısmında örtü kalınlığı ve oyma yapı yüksekliği değişimi incelenmiştir. Oyma yapı genişliğinin 5.5 m olması durumunda oyma yapı yüksekliği 4.5 m, 5.5 m ve 6.5 m olarak modellenerek Hoek- Brown bünye modeli ile güvenlik analizi yapılmıştır. Yapılan güvenlik analizi sonucunda her iki oyma yapı türü için elde edilen değerler Şekil 6.8’de gösterilmiştir.



Şekil 6.8 Örtü kalınlığı genişlik oranına bağlı güvenlik sayısı değişimi (Hoek-Brown Bünye Modeli)

Şekil 6.8 incelendiğinde oyma yapı sabit örtü kalınlığı altında, e/B oranının artması ile güvenlik sayılarının düştüğü görülmektedir. Benzer şekilde oyma yapı sabit genişlikte oyma yapı H/B oranının artması ile de güvenlik sayılarının azaldığı belirlenmiştir. Kemer tavanlı oyma yapı ve düzlem tavanlı oyma yapı karşılaştırıldığında kemer tavanlı oyma yapıda daha yüksek güvenlik sayılarının elde edildiği görülmüştür. Düzlem tavanlı oyma yapıda değişen H/B oranlarının güvenlik sayıları üzerinde kemer tavanlı oyma yapı da olduğu kadar etken olmadığı belirlenmiştir. Kabul edilen şartlar altında, güvenlik sayısı incelenen tüm durumların KOY yönetmeliği minimum güvenlik sayısı (statik durumda 1.5) üzerinde olduğu da belirlenmiştir.

Günümüzde giderek yaygınlaşan yer altı çalışmaları, mühendislik alanındaki araştırmalarda giderek önem kazanmaktadır. Tünel, depo, otopark gibi farklı amaçla kullanılan yer altı yapılarının birçoğu kaya ortamında inşa edilmektedir. Bu durum kaya ortamında açılan yer altı yapılarında, kayanın deformasyon ve gerilme davranışının belirlenmesinin önemini ortaya çıkartmaktadır.

Bu tez kapsamında Nevşehir Kapadokya bölgesindeki tüflerde inşa edilen depo amaçlı kaya oyma yapıların davranışı incelenmiş; yer değiştirme, gerilme ve şekil değiştirme durumları değerlendirilmiştir. Farklı örtü kalınlıkları altında, kemer ve düzlem tavanlı olarak süreksizlik içermeyen bir kaya ortamında açıldığı kabul edilen kaya oyma yapıların Lineer Elastik, İdeal Plastik ve Hoek-Brown zemin bünye modelleri ile yapılan analizlerden elde edilen sonuç ve öneriler aşağıda verilmiştir.

- KOY yönetmeliği 2017’de zayıf kayalar için önerilen minimum örtü kalınlığı (5,0 m) altında Lineer Elastik, İdeal Plastik ve Hoek-Brown analizler sonucunda her iki tip oyma yapıda da yer değiştirme değerlerinin birbirine yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Yer değiştirmelere ek olarak kayma şekil değiştirmeleri de birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Bu durum analizlerde kullanılan parametrelerin elastik sınırlar içerisinde kaldığını, ortamda herhangi bir plastik davranış oluşmadığını doğrulamaktadır.
- Örtü kalınlığının artması ile oyma yapı etrafında meydana gelen yer değiştirme, kayma şekil değiştirmesi ve gerilme büyüklüklerinin arttığı görülmüştür. Kullanılan tüm bünye modelleri ile yapılan analizler sonucunda minimum örtü kalınlığında en büyük yer değiştirmelerin kemer tavanlı oyma yapıda taban kısmında; düzlem tavanlı oyma yapıda taç ve taban kısmında meydana geldiği görülmüştür. Artan örtü kalınlığı ile birlikte her iki oyma yapıda da taç ve taban bölgelerinin kritik olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

- Minimum örtü kalınlığı ile yapılan analizler sonucunda en büyük kayma şekil değiştirmesinin kemer tavanlı oyma yapıda taban köşe noktalarda; düzlem tavanlı oyma yapıda taban köşe noktalara ek olarak tavan köşe noktalarda da olduğu gözlenmiştir. Örtü kalınlığının artması ile kemer tavanlı oyma yapıda da tavan köşe noktalarda kayma şekil değiştirmelerinin kritik olabileceği belirlenmiştir. Kayma şekil değiştirmelerinin kritik olduğu noktalar, deviator gerilmelerin en büyük değerini aldığı ve yük altında en çok zorlanabilecek kısımları ifade etmektedir.
- Asal gerilmeler ve asal şekil değiştirmeler değerlendirildiğinde oyma yapı taç ve taban köşe noktalarında asal gerilmelerin yoğunlaştığı analizler sonucunda görülmüştür. Asal şekil değiştirmelerin ise minimum örtü kalınlığı altında taban köşe noktalarında yoğunlaştığı, artan örtü kalınlığı ile tavan köşe noktalarda da yoğunlaşmanın olduğu sonucu elde edilmiştir.
- İP ve HB bünye modelleri ile yapılan sensitivite analizi sonucunda yer değiştirmeler üzerinde büyük oranda elastisite modülünün, gerilmeler üzerinde ise birim hacim ağırlık değerinin büyük oranda etken olduğu belirtilmiştir. Ortam rijitliğinin artması ile yer değiştirmelerin oyma yapının farklı bölgelerinde olduğu gözlenmiştir. Düşük rijitliklerde taç kısmında oturma şeklinde meydana gelen yer değiştirmeler, yüksek rijitliklerde taban kısmında kabarma şeklinde meydana gelmiştir.
- Oyma yapı etrafında oluşan kayma şekil değiştirmelerinin de yüksek oranda ortamın elastisite modülünden etkilendiği sensitivite analizi sonucunda belirlenmiştir. Ortamın düşük rijitlikte olması durumunda taban köşe noktasından taç kısmına doğru yayılım gösteren kayma şekil değiştirmeleri, yüksek rijitliklerde taban köşe noktasında ve tabanda yoğunlaşmıştır.
- Malzeme birim hacim ağırlık değerinden etkilenen gerilmelerin parametre analizi sonucunda minimum durumda daha yüksek basınç gerilmelerinin meydana geldiği görülmüştür. Maksimum durumda taban köşe noktalarda gerilmeler yoğunlaşırken, minimum durumda taban köşe noktalara ek olarak tavan köşe noktalarda da gerilmelerin yoğunlaştığı belirlenmiştir.
- Oyma yapı etrafında seçilen dört farklı kritik noktada ki düşey ve yatay gerilme değişimleri incelendiğinde, yanal gerilmeler azalmış; düşey gerilmeler

ise ta ve taban noktalarda azalırken, köşe noktalarda artmıştır. Kazı sonrasında tüm bünye modellerinde, düşey basınç gerilmeleri yanal basınç gerilmelerinden daha büyük değerler vermiştir. Tüm bünye modellerinde ortamda örtü kalınlığının artması ile çekme gerilmeleri 15-30 kPa arasında değerler almıştır.

- Kritik durum değerlendirilmesinde tüm örtü kalınlıklarında, her iki oyma yapı türünde de sınır durum aşılmamıştır. Genel olarak oyma yapı ta kısmında kazı ile ortalama gerilmeler azalmış, deviatör gerilmeler artmıştır. Oyma yapı taban ve tavan köşe noktalarında ise hem ortalama hem de deviatör gerilmeler artmıştır.
- Oyma yapılarda sabit örtü kalınlığı altında e/B oranının artması, sabit oyma yapı genişliğinde H/B oranının artması güvenlik sayılarını azaltmıştır.
- Yapılan tüm değerlendirmeler sonucunda kemer tavanlı oyma yapıda düzlem tavanlı oyma yapıya göre daha küçük yer değiştirme, gerilme ve kayma şekil değiştirmeleri oluşmuştur. Bu durum KOY yönetmeliğinde belirtilen depo amaçlı kaya oyma yapıların tavanının kemer şeklinde açılması gerektiği düşüncesini desteklemektedir.
- Benzer şekilde ta kısmında oluşan gerilmelerin azalması ve yan yüzeyler tarafından taşınması da KOY yönetmeliğinde belirtilen minimum örtü kalınlığı, oyma yapı ta kısmında meydana gelen gerilmelerin yan yüzeylere aktarılmasını sağlayacak kalınlıkta seçilmesi ibaresini desteklemektedir.

- Akbay D., Koççaz C.E., Altındağ R., Uğur İ. ve Varol M., (2014). "Doğal Taşların Nokta Yük Dayanım İndeks Değerlerinin Sıcaklık Etkisine Bağlı Olarak Değişimi", XI. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, Afyonkarahisar.
- Barton N., Lien R. ve Lunde J., (1974). "Engineering of Rock Masses for the Design of Tunnel Support", Rock Mechanics, 6: 189-236.
- Bhatkar T., Usmani A., Mandal A. ve Nanda A., (2018), "Wedge Failure Analysis and Remedial Measures in Large Unlined Rock Cavern: A Case Study" Archives of Mining Sciences, 63(4): 963-974.
- Bienawski Z.T., (1989). Engineering Rock Mass Classifications, John Willey and Sons, 237, Newyork.
- Brinkgreve R.B.J., Kumarswamy S., Swolfs W.M., Zampich L. ve Ragi Manoj N., (2019). Plaxis 2D Reference Manual, Plaxis BV.,Hollanda.
- Broch E. ve Franklin J.A., (1972). "The Point-Load Strength Test", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 9: 669-697.
- Deere, D.U., (1989). "Rock Quality Designation (RQD) After Twenty Years", US Army Corps of Engineers Contract Report, GL-89-1. Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station.
- Gao C., Deng J. ve Meng F., (2012). "Analysis on Factors Influencing Deformation of the Underground Cavities during the Construction Period", Advanced Materials Research, 446(449): 2722-2726.
- Goodman R. E., (1989). Kaya Mekaniğine Giriş, Gazi Kitabevi, Ocak 2003, Ankara, Çeviren: Kamil Kayabalı
- Hoek E. ve Brown E.T., (2018). "The Hoek-Brown Failure Criterion and GSI", Journal of Geotechnical Engineering, 1-19.
- Karaman K. ve Kesimal A., (2012). "Kayaların Tek Eksenli Basınç Dayanım Tahmininde Nokta Yüğü Deney Yöntemleri ve Porozitenin Değerlendirilmesi", Madencilik Dergisi, 51(4): 3-14.
- Kayadan Oyma Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik, (2017). T.C. Resmi Gazete, 18 Ekim 2017.
- Kılıç R., (2005). Kaya Mekaniği Ders Notları, A.Ü.F.F. Döner Sermaye İşletme Yayınları, No:39, Ankara.
- Sarı M. ve Çömlekçiler F., (2006). "Kızılkaya İgnimbritlerinde Görülen Süreksizliklerin İncelenmesi ve Kaya Kütlelerinin Tanımlanması", 30. Yıl Fikret Kurtman Jeoloji Sempozyumu, Selçuk Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Konya.
- Sönmez H. ve Ulusay R., (2002). Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri, Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, No: 60, 243, Ankara.

- Şengün E., (2013). "Oyuk Genişlemesi Probleminin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İki Boyutlu Analizi", Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- T.C. Ulaştırma Bakanlığı Demiryollar, Limanlar, Havameydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü Geoteknik Tasarım Esasları (2007), Yüksel Proje.
- Topal T., (2000). "Nokta Yükleme Deneyi ile ilgili Uygulamada Karşılaşılan Problemler", Jeoloji Mühendisliği, 24(1): 73-86.
- Ulusay R. ve Aydan Ö., (2018). "Geo-engineering Aspects on the Structural Stability and Protection of Historical Man-Made Rock Structures: An overview of Cappadocia Region (Turkey) in the UNESCO's World Heritage List", Bull Engineering Geological Environmental, 77: 457-488.
- Usmani A., Pal S. ve Nanda A., (2018). "Continuum and Discontinuum Analysis of Rock Caverns", Indian Geotechnical Journal, 48(4):663-667.
- Örüng İ., Karaman S. ve Şirin Ü., (2016). "Nevşehir Yöresindeki Doğal Depoların Modern Depolarla Karşılaştırılması", Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi TARGİD, Özel Sayı: 9-18
- Wu A., Wang J., Zhou Z., Huang S., Ding X., Dong Z. ve Zhang Y., (2016). "Engineering rock mechanics practices in the underground powerhouse at Jinping I hydropower station" Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 8: 640-650.
- Wu J., Zhang Y. ve Li H., (2012). "Stability Analysis of Underground Caverns by Jointed Finite Element Method", Applied Mechanics and Materials, 238: 814-817.
- Yang W., Zhang Q., Ranjith P.G., Yu R., Luo G., Huang C. ve Wang G., (2019). "A damage mechanical model applied to analysis of mechanical properties of jointed rock masses", Tunneling and Underground Space Technology, 84: 113-128.
- Yıldırım M. ve Gökaşan E., (2013). Mühendisler için Jeoloji Bilgileri, Genişletilmiş İkinci Baskı, Y.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.

Lineer Elastik Bünye Modeli Gerilme Değerleri

Örtü kalınlığı (m)	Model	Nokta	Lineer elastik bünye modeli			
			σ_1 (kN/m ²)		σ_3 (kN/m ²)	
			Başlangıç	Son	Başlangıç	Son
5,0	Kemer tavanlı	A	-69,15	-49,32	-34,57	-0,22
		B	-90,61	-189,83	-45,31	-5,0
		C	-145,33	-452,74	-72,66	-58,47
		D	-148,21	-20,8	-74,11	-1,21
	Düzlem tavanlı	A	-68,9	-6,05	-34,45	9,16
		B	-74,45	-305,9	-37,23	-18,83
		C	-145,42	-465,01	-72,71	-56,29
		D	-148,21	-21,86	-74,11	-1,21
15,0	Kemer tavanlı	A	-209,0	-155,3	-104,5	-3,26
		B	-229,13	-438,18	-114,56	-9,9
		C	-285,0	-941,17	-142,51	-62,42
		D	-288,62	-41,75	-144,31	-1,54
	Düzlem tavanlı	A	-208,9	-30,06	-104,45	1,66
		B	-214,84	-720,74	-107,42	-58,81
		C	-285,66	-898,31	-142,83	-203,99
		D	-287,9	-42,23	-143,95	-0,71
30,0	Kemer tavanlı	A	-418,82	-303,52	-209,41	-9,17
		B	-447,63	-890,29	-223,81	-37,7
		C	-492,91	-1300,2	-246,45	-86,6
		D	-499,43	-78,14	-249,71	-1,11
	Düzlem tavanlı	A	-418,69	-62,2	-209,35	1,89
		B	-423,72	-1330,3	-211,86	-120,61
		C	-493,3	-1253,7	-246,65	-153,23
		D	-499,4	-83,16	-249,7	-1,2

İdeal Plastik Bünye Modeli Gerilme Değerleri

Örtü kalınlığı (m)	Model	Nokta	İdeal plastik bünye modeli			
			σ_1 (kN/m ²)		σ_3 (kN/m ²)	
			Başlangıç	Son	Başlangıç	Son
5,0	Kemer tavanlı	A	-69,15	-63,48	-38,84	-0,54
		B	-90,61	-189,44	-50,89	-4,98
		C	-145,33	-460,34	-81,62	-60,35
		D	-148,21	-30,76	-83,24	-1,21
	Düzlem tavanlı	A	-68,9	-11,32	-38,69	1,1
		B	-74,45	-310,6	-41,81	-19,61
		C	-145,42	-474,03	-81,67	-57,96
		D	-148,21	-31,85	-83,24	-1,2
15,0	Kemer tavanlı	A	-209,0	-190,9	-117,38	-4,23
		B	-229,1	-440,33	-128,6	-10,02
		C	-285,0	-955,54	-160,1	-64,92
		D	-288,62	-61,21	-162,1	-1,55
	Düzlem tavanlı	A	-208,9	-45,03	-117,3	1,63
		B	-214,84	-734,39	-120,66	-60,0
		C	-285,7	-917,77	-160,43	-212,03
		D	-287,9	-61,72	-161,7	-0,72
30,0	Kemer tavanlı	A	-418,8	-371,6	-235,2	-11,31
		B	-438,5	-820,52	-246,3	-36,21
		C	-492,9	-1312,5	-276,8	-90,1
		D	-499,4	-111,96	-280,5	-1,14
	Düzlem tavanlı	A	-488,6	-109,4	-274,4	-1,1
		B	-494,5	-1668,7	-277,7	-123,8
		C	-563,0	-1420,0	-316,2	-162,7
		D	-594,4	-142,5	-319,8	-1,3

Hoek-Brown Bünye Modeli Gerilme Değerleri

Örtü kalınlığı (m)	Model	Nokta	Hoek-Brown bünye modeli			
			σ_1 (kN/m ²)		σ_3 (kN/m ²)	
			Başlangıç	Son	Başlangıç	Son
5,0	Kemer tavanlı	A	-69,15	-49,33	-34,57	-0,22
		B	-101,44	-209,79	-50,72	-5,57
		C	-145,33	-452,63	-72,66	-58,44
		D	-148,21	-20,79	-74,11	-1,21
	Düzlem tavanlı	A	-68,9	-6,05	-34,45	9,16
		B	-74,45	-305,9	-37,23	-18,83
		C	-145,42	-465,01	-72,71	-56,29
		D	-148,21	-21,86	-74,107	-1,21
15,0	Kemer tavanlı	A	-209,0	-155,3	-104,5	-3,26
		B	-229,13	-438,13	-114,56	-9,9
		C	-285,02	-935,84	-142,51	-55,36
		D	-288,62	-41,73	-144,31	-1,54
	Düzlem tavanlı	A	-208,9	-30,08	-104,45	1,66
		B	-214,84	-720,57	-107,42	-58,79
		C	-285,66	-892,17	-142,83	-189,53
		D	-287,9	-42,24	-143,95	-0,71
30,0	Kemer tavanlı	A	-418,82	-304,13	-209,41	9,19
		B	-438,5	-813,32	-219,25	-35,66
		C	-492,91	-1253,9	-246,46	-72,27
		D	-499,43	-78,29	-249,71	-1,13
	Düzlem tavanlı	A	-418,69	-62,69	-209,35	1,87
		B	-423,72	-1308,3	-211,86	-118,59
		C	-493,3	-1206,0	-246,65	-109,21
		D	-499,43	-83,95	-249,71	-1,24

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgisi: bahar.yaman.41@gmail.com

Konferans Bildirileri

1. Kaya Oyma Yapı davranışının Sayısal Analizler ile İncelenmesi, 8. Uluslar arası Geoteknik Sempozyumu, İ.T.Ü Süleyman Demirel Kültür Merkezi, İstanbul, 2019.

