

T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
DOKTORA TEZİ

**KAYA ŞEVLERİNDE OLUŞAN YENİLME
MEKANİZMALARININ AYRIK ELEMANLAR
YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

Şaziye Özge DİNÇ

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Tezin Sunulduğu Tarih: 23/12/2016

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Nihat Sinan IŞIK

ÇANAKKALE

Şaziye Özge Dinç tarafından Doç. Dr. Nihat Sinan IŞIK yönetiminde hazırlanan ve 23/12/2016 tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “**Kaya Şevlerinde Oluşan Yenilme Mekanizmalarının Ayrık Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi**” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı**’nda **DOKTORA TEZİ** olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

Prof. Dr. Harun SÖNMEZ

.....

Başkan

Doç. Dr. Nihat Sinan IŞIK

.....

Üye

Doç. Dr. Ahmet Hamdi DELİORMANLI

.....

Üye

Yrd. Doç. Dr. Öznur KARACA

.....

Üye

Prof. Dr. Süha ÖZDEN

.....

Üye

Prof. Dr. Levent GENÇ

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

Sıra No:.....

Bu tez çalışması, TÜBİTAK tarafından 114M852 numaralı projeden desteklenmiştir.

İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI



Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belirttiğimi beyan ederim.

Şaziye Özge DİNÇ

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleştirilmesinde, çalıŐmam boyunca bana destek olan, beni yönlendiren, emek veren, katkı sunan danıŐmanım Doç. Dr. Nihat Sinan IŞIK'a, yüksek lisans dönemimden itibaren her zaman bana yardım eden, yol gösteren, emek veren ve bu mesleği sevmemde büyük katkısı olan değerli hocam Prof. Dr. Harun SÖNMEZ'e, tüm doktora dönemim boyunca desteğini bir an olsun üzerimden eksik etmeyen, her zaman yanımda olan, beni motive eden Yrd. Doç. Dr. Öznur KARACA'ya, tezin yürütülmesine katkı sunan ve bana güvenen tez izleme komitesi yesi Doç. Dr. Ahmet DELORMANLI'ya, jüri üyelerimden Prof. Dr. Süha ÖZDEN'e ve hayatımın her evresinde yanımda olan sevgili aileme sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

Şaziye zge DN
anakkale, Aralık 2016

SİMGELER VE KISALTMALAR

σ_c	Tek eksenli sıkışma dayanımı
E	Elastisite modülü
σ_t	Çekme dayanımı
g	Yerçekimi ivmesi
W	Kütle
A	Yüzey alanı
ϕ	İçsel sürtünme açısı
c	Kohezyon
F	Gravite oranı
F	Güvenlik katsayısı
H	Yükseklik
d	Kaya köprüsü aralığı
emod	Efektif modül
krat	Rijitlik oranı
pb_fa	Sürtünme açısı
pb_ten	Paralel bağ çekme dayanımı
pb_coh	Paralel bağ kohezyonu
sj	Smooth-joint
sj_kn	Smooth-joint normal rijitlik
sj_ks	Smooth-joint makaslama rijitliği
sj_fric	Smooth-joint sürtünme katsayısı
fj	Flat-joint

ÖZET

KAYA ŞEVLERİNDE OLUŞAN YENİLME MEKANİZMALARININ AYRIK ELEMENLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

Şaziye Özge DİNÇ

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi

Danışman : Doç. Dr. Nihat Sinan IŞIK

23/12/2016, 86

Gerilmelere bağlı olarak kaya kütlelerinin nasıl bir davranış sergileyeceği geçmişten beri kaya mekaniği veya jeoteknik projelerde en önemli araştırma konusu olmuştur. Bu amaçla kaya malzemeleri üzerinde çok sayıda laboratuvar deneyi yapılmış, kaya kütlelerine geçişler için birçok görgül yenilme eşitlikleri geliştirilmiştir. Ancak bu yöntemler tam olarak bir kaya karakterizasyonunu belirlemede veya kaya kütleleri davranışını ortaya koymada anizotropi, rijitlik, ölçek etkisi gibi özellikleri dikkate almadığından eksik kalmıştır. Son yıllarda geliştirilen nümerik yöntemler bu açığı kapatmada oldukça yararlı bir araç olmuştur. Kaya kütleleri gibi heterojen ortamların modellenmesinde nümerik yöntemlerden ayrık elemanlar yöntemine başvurulmaktadır. Söz konusu yöntem mikro ölçekten başlayarak karmaşık makro davranışların modellenmesine olanak sağlamaktadır. Bu amaçla bu tez kapsamında ayrık elemanlar yöntemini esas alan PFC2D adlı yazılımla kaya şevlerinde meydana gelen yenilme mekanizmaları araştırılmıştır. Yapılan çok sayıda analizle bu mekanizmalar üzerinde etkili olan parametreler belirlenmiş ve bir kaya şevinde başlayan yenilmenin ilerleme aşamaları modellenerek ortaya konulmuştur.

Anahtar sözcükler: Ayrık Elemanlar Yöntemi, Kaya Kütleleri Davranışı, Şev Yenilme Mekanizmaları.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF FAILURE MECHANISMS OF ROCK SLOPES BY DISTINCT ELEMENT METHOD

Şaziye Özge DİNÇ

Çanakkale Onsekiz Mart University

Graduate School of Natural ve Applied Sciences

Doctoral Dissertation in Geological Engineering

Advisor : Assoc. Prof. Dr. Nihat Sinan IŞIK

23/12/2016, 86

The subject of how rocks behave under applied stresses has been the most important issue in rock mechanics or geotechnical projects since from the past. To clinch an argument, lots of laboratory tests have been conducted on rock materials and lots of empirical failure equations have been developed for rock masses. However these methods have some limitation because of not reflecting such properties anisotropy, britleness, scale effects for an absolute identification of rock characterizations or rock mass behavior. Recently, numerical methods have been regarded as a useful tool to cover this limitation. The distinct element method as one of the numerical tools has been used to model heterogeneous media such as rock masses. This method can mimic complex macro behavior starting from micro scale. For this purpose, in the scope of this thesis, rock slope failure mechanisms have been investigated by using a distinct code, PFC2D. The effective parameters on rock mass failure mechanisms have been determined and the propagation of failure in a slope has been modeled by performing a number of numerical analysis.

Keywords: Discrete Element Method, Rock Mass Behavior, Slope Failure Mechanisms.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ SINAV SONUÇ FORMU	ii
İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Önemi ve Amacı	1
1.2. Ayrık Elemanlar Yöntemine Dayana Yazılımlar	3
2.1.1. UDEC (Universal distinct element code)	4
2.1.2. 3DEC (Three dimensional distinct element code)	4
2.1.3. YADE	5
2.1.4. ELFEN	5
2.1.5. NMM (Numerical manifold method)	6
2.1.6. DDA (Discontinious deformation analysis)	6
2.1.7. PFC (Particle flow code)	6
BÖLÜM 2	
ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	8
BÖLÜM 3	
MATERYAL VE METOT	17
3.1. Lineer Yöntem	19
3.2. Lineer Kontak Bağ Yöntemi	19
3.3. Lineer Paralel Bağ Yöntemi	20
3.4. Flat-Joint Bağ Yöntemi	21
3.5. Smooth-Joint Bağ Yöntemi	23
3.6. Gravite Arttırma Yöntemi	24
3.7. Kullanılan Parametreler	25
BÖLÜM 4	
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	27
4.1. Kaya Malzemelerinin Oluşturulması	27
4.2. Süreksizliklerin Oluşturulması	30
4.3. Kaya Şevlerinin Oluşturulması	33

4.3.1. Düzlemsel Yenilme Mekanizması.....	36
4.3.2. Devrilme Türü Yenilme Mekanizması	44
4.3.3. Basamaklı Şev Yenilmesi	54
4.3.4. Birden Fazla Eklem Seti İçeren Şevlerdeki Yenilme Mekanizması.....	60
4.4. Nümerik Sonuçların Vaka Üzerinde Test Edilmesi	67
BÖLÜM 5	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR	78
ÖZGEÇMİŞ	I



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 1.1. Sıkışma altında meydana gelen yenilme safhaları (Kılıç, 2005)	2
Şekil 1.2. Kaya şevlerinde meydana gelen yenilme türleri (Hoek ve Bray, 1981)	3
Şekil 3.1. PFC'de hesaplama döngüsü (Itasca, 2015).....	18
Şekil 3.2. Partikül-partikül ve partikül-duvar arayüzü (Potyondy, 2015).....	19
Şekil 3.3. Paralel bağ yöntemine göre tutturulmuş partiküllerin mikro yapısı (Potyondy, 2015).....	20
Şekil 3.4. Lineer paralel bağın davranışı ve reolojik bileşenleri (Potyondy, 2014).....	21
Şekil 3.5. Kuvvet ve yerdeğiştirmeye bağlı olarak gelişen yenilme türleri (Cho ve ark., 2007)	21
Şekil 3.6. Flat joint bağ modelinin reolojik bileşenleri	22
Şekil 3.7. Paralel bağ (a) ve flat joint bağ (b) modeli	22
Şekil 3.8. Smooth-joint bağ modelin partikül hareketi (Itasca, PFC klavuzu)	23
Şekil 3.9. Smooth-joint bağ modelinin reolojik bileşenleri (Itasca, PFC klavuzu).....	23
Şekil 3.10. a) Eklem geometrisi b) Gravite etkisi altında makaslanmaya uğrayan smooth-joint yüzeyi (Ivars ve ark., 2008)	24
Şekil 3.11. Paralel bağ ile tutturulmuş bir kayanın mikro görünümü (Huang ve ark. 2015)	26
Şekil 4.1. Gauss dağılımına göre yerleşmiş 8-12 cm çaplı partiküller.....	27
Şekil 4.2. Gerilim-deformasyon eğrisinde elastisite modülü belirleme	28
Şekil 4.3. Örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımı ve çekme dayanımı deneylerinden elde edilen gerilim-deformasyon eğrileri	29
Şekil 4.4. Düzlemsel kayma analizlerinde kaya köprüsü aralıkları sırasıyla a) 1 m b) 0.6 m ve c) 0.4 m dir.....	32
Şekil 4.5. Devrilme analizlerinde kaya köprüsü aralıkları sırasıyla a) 0 b) 0.4 m ve c) 0.6 m dir	32
Şekil 4.6. Kaya şevi duraylılık analizlerinde izlenecek adımların şematik gösterimi	36
Şekil 4.7. Düzlemsel kayma mekanizması şematik görünümü.....	37
Şekil 4.8. a) Düşük normal gerilme seviyesinde çekme yenilmesini b) yüksek normal gerilme seviyesinde makaslama yenilmesini gösteren Mohr dairesi (Einstein ve ark., 1983)	39
Şekil 4.9. Şev yüksekliği 8 m ve şev eğim açısı 55° iken kaya köprüsü aralıklarına bağlı olarak gelişen yenilme mekanizması	40

Şekil 4.10. Şev yüksekliği 8 m ve şev eğim açısı 75° iken kaya köprüsü aralıklarına bağlı olarak gelişen yenilme mekanizması	41
Şekil 4.11. Şev yüksekliği 10 m ve şev eğim açısı 55° iken kaya köprüsü aralıklarına bağlı olarak gelişen yenilme mekanizması	42
Şekil 4.12. Şev yüksekliği 10 m ve şev eğim açısı 75° iken kaya köprüsü aralıklarına bağlı olarak gelişen yenilme mekanizması	43
Şekil 4.13. Kaya türü ve kaya köprüsü aralıkları ile F arasındaki ilişki	44
Şekil 4.14. Devrilme türü yenilme mekanizması (Hoek ve Bray, 1977)	45
Şekil 4.15. Şev yüksekliği 8 m iken kaya köprüsü aralıklarına bağlı olarak yenilmenin başlaması	47
Şekil 4.16. Şev yüksekliği 8 m iken kaya köprüsü aralıklarına bağlı olarak yenilmenin gelişme evresi	48
Şekil 4.17. Şev yüksekliği 8 m iken kaya köprüsü aralıklarına bağlı olarak yenilmenin sonlanmış hali	49
Şekil 4.18. Örnek türü ve kaya köprüsü aralığının gravite oranı ile olan ilişkisi	50
Şekil 4.19. Şev yüksekliği 10 m iken kaya köprüsü aralıklarına bağlı olarak yenilmenin başlaması	51
Şekil 4.20. Şev yüksekliği 10 m iken kaya köprüsü aralıklarına bağlı olarak yenilmenin gelişme evresi	52
Şekil 4.21. Şev yüksekliği 10 m iken kaya köprüsü aralıklarına bağlı olarak yenilmenin sonlanmış hali	53
Şekil 4.22. Basamaklı şev yenilme mekanizması	55
Şekil 4.23. Tek eksenli sıkışma altında eklemlerin birleşmesi veya kaya köprüsünde görülen yenilme (Wond ve Einstein, 2009)	55
Şekil 4.24. Süreksizliklerin içsel sürtünme açısı 10° olan kesikli eklemler (devamlı olmayan) şev modellerindeki basamaklı yenilme mekanizması	57
Şekil 4.25. İçsel sürtünme açısı 20° olan kesikli eklemler (devamlı olmayan) şev modellerindeki basamaklı yenilme mekanizması	58
Şekil 4.26. İçsel sürtünme açısı 30° olduğunda şevlerdeki basamaklı yenilme mekanizması	59
Şekil 4.27. Eklemlerin içsel sürtünme açısı 30° ve $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ iken şev stabilite durumu	60
Şekil 4.28. Eklemlerin içsel sürtünme 20° iken şevlerde meydana gelen yenilmeler	61

Şekil 4.29. Eklemlerin içsel sürtünme açısı 10° iken şevlerin yenilme mekanizması	62
Şekil 4.30. Eklemlerin içsel sürtünme açısı 10° iken şevlerin yenilme mekanizması	64
Şekil 4.31. Eklemlerin içsel sürtünme açısı 20° iken şevlerin yenilme mekanizması	65
Şekil 4.32. Eklemlerin içsel sürtünme açısı 30° iken şevlerin yenilme mekanizması	66
Şekil 4.33. Vaka I: Şevin ilksel geometrisi	69
Şekil 4.34. Vaka II: Şevin ilksel geometrisi	70
Şekil 4.35. Ayırık elemanlar ve sonlu elemanlar yöntemlerine dayalı yazılımlardan elde edilen I. vakaya ait model sonuçları (Hammah ve ark., 2007).....	71
Şekil 4.36. PFC'den elde edilen şev yenilme mekanizması	71
Şekil 4.37. Ayırık elemanlar ve sonlu elemanlar yöntemlerine dayalı yazılımlardan elde edilen II. vakaya ait model sonuçları (Hammah ve ark., 2007)	73
Şekil 4.38. PFC'den elde edilen ikinci vakaya ait model sonuçları	74

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. Kaya kütlelerinin oluşturulmasında kullanılan yöntemlerdeki parametreler	25
Çizelge 4.1. Kaya malzemelerinin paralel bağ yöntemine göre belirlenen mikro mekanik özellikleri	28
Çizelge 4.2. Kaya malzemelerinin makro mekanik özellikleri	29
Çizelge 4.3. Smooth-joint yöntemine göre belirlenen eklemlerin mikro parametreleri	31
Çizelge 4.4. Gravite arttırma yöntemine göre elde edilen gravite oranları (F)	44
Çizelge 4.5. Gravite arttırma yöntemine göre belirlenen gravite oranları (F)	50
Çizelge 4.6. Eklemlerin içsel sürtünme açılarına göre şevlerin duraysızlığa geçtiği andaki gravite oranları	55
Çizelge 4.7. Kaya malzemesinin nümerik analizlerden elde edilen mikro ve makro parametreleri	68
Çizelge 4.8. Kaya malzemesi ve süreksizliklere ait makro özellikler	68
Çizelge 4.9. Eklemlerin smooth-joint yöntemine göre belirlenen mikro parametreleri	69
Çizelge 4.10. Vakalara ait gravite oranları	70

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Dayanım ve deformasyon özelliği tanımlanan bir kaya kütesinin temel alınacağı mühendislik yapısının türüne (şev, tünel, baraj, bina vb.) ve yapılacak teknik müdahaleye bağlı olarak malzemenin nasıl bir davranış göstereceğinin kestirimi, mühendislik çalışmalarındaki belirlenmesi gereken en önemli unsurdur. Son yıllarda geliştirilen sayısal modelleme yöntemleri, mühendislik projelerinde kaya kütesi davranışının önceden belirlenmesi açısından son derece yararlı bir yöntem olmuştur. Gerilme, stabilite ve deformasyon analizlerinde kullanılan bu diferansiyel yöntemler; sonlu elemanlar, sonlu farklar, sınır elemanları, ayırık elemanlar ve melez yöntemler şeklinde sıralanmaktadır. Bu yöntemler arasından statik ve dinamik yüklerin etkisi altında eklem, çatlak, tabakalanma, foliasyon yüzeyi gibi yapısal unsurları içeren süreksiz ortamların modellenmesinde, ayırık elemanlar yöntemine başvurulmaktadır.

Bu tez çalışmasında kaya şevlerindeki yenilme mekanizmaları ve bu mekanizmalar üzerinde etkili olan kaya kütesi parametreleri incelenmiştir. Bu amaçla ayırık elemanlar yöntemine dayanan iki boyutlu Particle Flow Code (PFC2D) yazılımı kullanılmış ve farklı şev geometrilerindeki yenilme türleri modellenerek, her bir parametrenin (kaya malzemesi, süreksizlik özellikleri) yenilme üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

1.1. Çalışmanın Önemi ve Amacı

Eklem, tabakalanma, şistozite, fay vb. doğal süreksizliklerin arasında kalan ve çekilme dayanımının azalmasına neden olabilecek herhangi bir kırık veya zayıflık düzlemi içermeyen değişik boyutlardaki kaya parçalarına kaya malzemesi, eklemler ile kaya malzemelerinin birlikte oluşturdukları kütleye de kaya kütesi adı verilir (Ulusay ve Sönmez, 2007). Dolayısıyla bir kaya kütesinin üzerinde veya içinde inşa edilen mühendislik yapısına bağlı olarak nasıl bir davranış göstereceği, o kaya kütesini oluşturan kaya malzemesi ve eklemlerin davranışlarıyla doğrudan ilişkilidir. Bu çalışmada baraj, tünel, yol vb. mühendislik yapılarının da bir parçası olan kaya şevlerinin yenilme davranışları ele alınmıştır. Bu amaçla birbirinden farklı eğim açılarında ve yüksekliklerinde şev modelleri tasarlanarak söz konusu şevlere farklı özelliklerdeki kaya kütleleri atanmıştır.

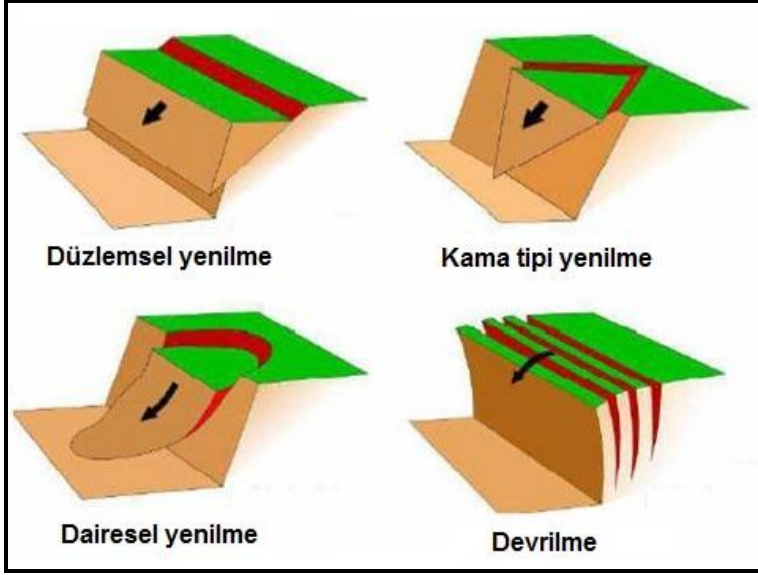
Bir kaya kütesi tek eksenli sıkışma dayanımına tabi tutulduğunda ortaya çıkan gerilme-deformasyon eğrisi, o kaya kütesinin yenilme safhalarını gösterir (Şekil 1.1).

Dayanıklı kaya kütlelerinde genellikle yenilmeler önceden varolan doğal eklem yüzeyleri boyunca gelişir. Artan ölçeğe bağlı olarak şevlerdeki bu yenilme mekanizmaları kama tipi kaymalardan, basamaklı yenilme ve genellikle zeminlerde görülen rotasyonel makaslama yenilmesi gibi kütsel olarak hareket eden kaya davranışlarına kadar ilerlemekte ve bu yenilmelere ek olarak çekme kuvvetlerinin de etkili olduğu devrilme ve bükülme türü mekanizmalar gözlenebilmektedir (Hammah ve ark., 2008) (Şekil 1.2). Ancak bir kaya şevindeki yenilme mekanizması yalnızca mevcut süreksizler tarafından kontrol edilmemekte, sağlam kayaya bağlı olarak veya yeni oluşan eklemlerle de gelişebilmektedir. Son yıllarda teknolojiadaki ilerlemelerle birlikte sayısal modelleme yöntemleri, özellikle bu tür mühendislik problemlerinin çözümlerinde oldukça etkili bir araç olmuştur. Bu yöntemlerden ayırık elemanlar metoduna dayanan yazılımlar (PFC, Yade, UDEC, 3DEC, ELFEN, NMM, DDA vb.) çok sayıda projede kullanılmış ve süreksiz ortamların modellenmesinde yüksek performans sağlamıştır.



Şekil 1.1. Sıkışma altında meydana gelen yenilme safhaları (Kılıç, 2005)

Bu tez çalışmasında ayırık elemanlar yönteminin esaslarına dayanan Itasca tarafından geliştirilmiş iki boyutlu Particle Flow Code (PFC) yazılımı kullanılmıştır. Söz konusu yazılım smooth-joint yöntemini (Ivars ve ark., 2008) kullanarak mevcut eklemlerin dışında yeni eklem oluşumlarını veya eklemlerin ilerleyişini dikkate almaktadır. Ayrıca PFC, ölçek etkisi veya anizotropi gibi kaya kütsesi özelliklerinin yenilme davranışındaki etkisini incelemeye olanak sağlamaktadır. Bu açıdan ele alındığında literatürde yer alan ayırık elemanlar yöntemine dayalı diğer yazılımlara göre üstünlüğü olup, söz konusu özellikleri aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.



Şekil 1.2. Kaya şevlerinde meydana gelen yenilme türleri (Hoek ve Bray, 1981)

Araştırma konusu, kullanılan yöntemler açısından Türkiye'de ilk defa uygulama alanı olarak bir ilki oluşturmaktadır. Özellikle bilgisayar destekli yazımlımlarda her geçen gün değişen teknolojik gelişmelere uyum sağlamak, sadece bilimsel faaliyetlere değil, aynı zamanda ülkemizde devam etmekte olan yapılaşma ve kentleşme sürecine (yol, şev, baraj, tünel vb.) de büyük katkılar sunacaktır.

1.2. Ayırık Elemanlar Yöntemlerine Dayanan Yazılımlar

Ayrık elemanlar yöntemi ilk kez 1971 yılında kaya mekaniği problemleri için geliştirilmiştir (Cundall, 1971; Burman, 1971). İlerleyen yıllarda zemin sorunlarına da adapte edilerek günümüze kadar kullanılarak gelmiştir (Cundall ve Strack, 1979). Cundall ve Hart (1992) ayırık elemanlar yöntemlerini, ayırık ve etkileşim halinde olan sistemlerin davranışlarının modellenmesinde kullanılan sayısal işlemler olarak tanımlamıştır. Sistemlerin etkileşimi, Newton'un ikinci hareket yasasına dayanmakta (kuvvet/yerdeğiştirme) ve bu şekilde harekete bağlı olarak meydana gelen deformasyon belirlenmektedir. Hareket veya yerdeğiştirme, zaman adımları algoritmasına göre çözülmektedir.

Sürekli modellere dayanan yöntemler (sonlu elemanlar, sonlu farklar, sınır elemanları yöntemi) özellikle masif, sağlam kaya veya zemin gibi davranan aşırı derecede eklemlili kaya kütleleri için uygundur. Birbirini kesen çok sayıda eklemden oluşan sistemlerin analizi veya eklemlerin ayrı ayrı kütle davranışındaki etkileri ise sürekli modellerle araştırılmamaktadır. Dolayısıyla ayırık elemanlar yöntemi eklemler gibi yapısal unsurlar tarafından kesilen kaya kütlelerinin davranışlarının belirlenmesinde daha etkili bir

metod olmuştur. Jing (2003), sürekli yöntemler ile ayrık elemanlar yöntemi (DEM) arasındaki temel farkı, ayrık elemanlar metodundaki sistem bileşenlerinin etkileşiminin deformasyon süresince sürekli olarak değişmesi, sürekli yöntemlerde ise bu bileşen etkileşiminin sabit kalması olarak belirtmiştir. Bir başka deyişle ayrık elemanlar metodu, eklemlerle ayrılan blokların birbiriyle olan temaslarının tanımlandığı ve bunların deformasyon/hareket boyunca sürekli olarak güncellendiği bir sistem olarak tanımlanmıştır (Jing ve Hudson, 2002).

Süreksiz modellere dayanan yöntemlerde (süreksiz deformasyon analizi, ayrık elemanlar, partikül akması) eklemlerle ayrılan bloklar birbiriyle etkileşim halinde, rijit ve/veya deforme olabilen yapılar şeklindedir. Sürekli yöntemlerde ise sistem, sadece deforme olan bir kütle olarak ele alınmıştır.

Bu tez çalışmasının sayısal analizleri ayrık elemanlar prensibine dayanarak geliştirilmiş olan Particle Flow Code yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Ancak literatürde söz konusu prensibe dayalı çok sayıda yazılım mevcuttur. Bu yazılımlardan en çok kullanılanlar ise aşağıda özet halinde verilmektedir.

1.2.1. UDEC (Universal distinct element code)

UDEC, statik ve dinamik yükler altında, kaya kütlelerinin veya ayrık bloklardan (rijit veya deforme olabilen bloklar) oluşan yapıların mekanik davranışlarının modellenmesinde kullanılan ayrık elemanlar yöntemine dayanan bir yazılımdır (Cundall, 1980). Bloklara ayrılarak oluşturulan sistemde deformasyonlar, Lagrvee yaklaşımıyla belirlenmektedir. Kaya kütlelerinde yenilme, sağlam kayacın plastik deformasyonu şeklindedir ve/veya mevcut eklemlerde yer değiştirme görülmektedir. Ancak bu yazılımda bir kaya külesine etki eden yükler sonucu oluşabilecek yeni eklemler dikkate alınmamakta, dolayısıyla sağlam kaya boyunca meydana gelebilecek yeni eklemlenmelerin simülasyonu yapılamamaktadır (Lisjak ve Grasselli, 2014). Her ne kadar bu durum poligonal blok modelleri oluşturularak aşılına çalışılsa da süreksizliğe ait özellikler (dayanıklılık vb.) ve gerilim faktörleri gözardı edilmiştir (Lorig ve Cundall, 1989; Lisjak ve Grasselli, 2014'den).

1.2.2. 3DEC (Three dimensional distinct element code)

Itasca tarafından geliştirilmiş yazılımda süreksiz ortam, konveks veya konkav şekilli (polihedral) rijit ve deforme olabilen üç boyutlu bloklardan oluşmaktadır (Cundall 1988; Hart ve ark., 1988). Bu bloklar sonlu farklar yöntemine göre oluşturulan bir örgü/ağ sistemi sonucu meydana gelmektedir. Eklemler bloklar arasındaki yer değiştirmelerin veya

rotasyonların görüldüğü sınırlardır. Normal ve makaslama yönlerinde süreksizler boyunca meydana gelen hareket, lineer ya da nonlinear kuvvet-yerdeğiştirme eşitliklerine göre çözülür (Israelsson, 1996). 3 boyutlu olarak geliştirilen yazılımda malzeme modelleri elastik, anizotropik, Mohr-Coulomb, Drucker Prager, bilineer plastisite, deformasyon azalması (strain softening), krip ve kullanıcı tanımlı olarak oluşturulabilmektedir.

1.2.3. YADE

Açık kaynaklı, linux sisteminde çalışan ve Python komut dilinin kullanıldığı ayırık elemanlar yöntemine dayalı bir yazılımdır. 2004 yılında Kozicki ve Galizzi adlı 2 araştırmacı tarafından SDEC adlı bir yazılımdan ilham alınarak oluşturulmaya başlanan program, daha sonraki yıllarda Grenoble Üniversitesi akademisyenlerince geliştirilerek günümüze kadar gelmiştir (Smilauer, 2010). Esas hatlarıyla birlikte Kozicki ve Donze (2008) tarafından literatüre sunulan yazılım, C++ dili kullanılarak oluşturulmuştur. Malzemenin makro-mekanik özellikleri (deformasyon, dayanım, hacimsel değişim, birim deformasyon vb.) küresel kümelerden oluşan sistemin mikro özelliklerinden (normal, tanjansiyel, dönme rijitliği, yerel sürtünme, boyutsuz plastik sabiti vb.) yola çıkılarak belirlenir. Sistem, deformasyonu her aralıkta hız ve ivmelerin sabit alındığı bir zaman algoritmasına göre çözer. Her devirde tekrar çözüm için sonlu farklar algoritması kullanılır ve böylece çok sayıda partikülden oluşan kümelerin non-lineer davranışı modellenabilir (Kozicki ve Donze, 2008).

1.2.4. ELFEN

ELFEN sürekli ve süreksiz modellerin (sonlu elemanlar ve ayırık elemanlar analizleri: FEM/DEM) her ikisini de kullanan melez (hibrid) bir sayısal yöntemdir (Rockfield, 1986). Özellikle mevcut eklemlerle, yeni oluşan eklemler arasındaki etkileşimin araştırılmasına olanak sağlayan yazılım, katı malzemenin ve eklemlenmenin sonlu elemanlarla modellenmesinde Rankine rotasyon ve Mohr Coulomb kriterini baz alır (Elmo, 2006). Sağlam kayada yeni eklem oluşumları ya da ilerleyişleri sonlu elemanlar analiziyle çözülürken, önceden varolan eklemler ayırık elemanlar yöntemine göre ele alınmaktadır (Eberhardt ve ark., 2003). Bir başka deyişle, mevcut gerilmeler sonlu elemanlara göre tanımlanan dayanım değerini aştığı zaman, ayırık elemanlara göre formülize edilen eklemlenme süreci başlamaktadır. Yazılımın en önemli dezavantajı karmaşık problemlerin çözümünde oldukça yüksek bir hafızaya ihtiyaç duymasıdır. Çatlak ilerleyişinin modellenmesinde yeniden ağ oluşturma süreci zaman alıcı hesaplamaları da beraberinde getirmektedir (Wong ve Wu, 2014).

1.2.5. NMM (Numerical manifold method)

NMM, deformasyonların ve kaya kütlesi davranışlarının modellenmesinde kullanılan sürekli (FEM) ve süreksiz metodların (DDA) birleşmesinden oluşmuş sayısal bir yöntemdir (Lei, 2011). İlk kez Shi tarafından 1991 yılında önerilmiş olan yöntemde, başlangıç koşulundaki sağlam malzemenin oluşturulmasında herhangi bir ağ sistemine ihtiyaç yoktur. Cai ve ark. (2013), özellikle kompleks şekilli eklemlerin modellenmesinde iyi bir yöntem olduğunu belirtmiştir. Büyük yerdeğiştirmeler, kaymalar, makaslamalar ve ayrık blok hareketlerine izin verilebilmekte, herhangi bir step/atlama fonksiyonu olmaksızın eklemler atanabilmekte, kompleks şekilli eklemler ele alınabilmekte ve basit integrasyonlarla zayıf şekiller de modellenmektedir (Wu ve Wong, 2013). Sürekli ve süreksiz analizlerin gerçekleştirilmesinde matematiksel ve fiziksel olmak üzere iki tür sonlu toplayıcı-örtü (cover) vardır. Element topolojisindeki şekilsel değişikliklerden kaynaklanan sayısal duraysızlıklar, matematiksel örtü kullanılarak çözülmektedir. Eklem ilerlemesi ise herhangi bir ağ düzenlemesi gerektirmeksizin fiziksel örtünün güncellenmesi ile modellenmektedir (Zheng ve ark., 2013).

1.2.6. DDA (Discontinuous deformation analysis)

Shi (1988) tarafından geliştirilmiş olan yöntem eklemlerle kaya kütlelerinde eklemlerle ayrılmış blokların birbirleriyle olan etkileşimini, dinamik denge formülasyonlarıyla çözer. Deformasyonlar kısa zaman adımlarında meydana gelen blok hareketlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Buradaki formüller, potansiyel enerjinin minimizasyonuna dayanır. Her bir blok belirli bir uniform gerilme-deformasyon koşuluna sahiptir. Blokların temas ettiği yüzeyler normal gerilme yönünde rijit olarak kabul edilir. Bloklar birbirlerinin üzerine bindirmez. Çözümler zaman-adım algoritmasına göre yapılır, ancak prensipleri rijitlik matriksine dayanmaktadır (Lemos, 2007).

1.2.7. PFC (Particle flow code)

Itasca tarafından 1995 yılında geliştirilmiş bir yazılım olan PFC, diğer ayrık elemanlar yöntemine dayanan yazılımlar gibi statik ve dinamik yükler altında kaya kütlelerinde oluşan mekanik davranışların modellenmesinde kullanılmaktadır. Partiküllerin bir araya gelmesiyle oluşturulan kaya kütlelerinin makro ölçekteki özelliklerinin (σ_c , σ_t , E vb.) belirlenmesi için bir dizi mikro parametrenin tanımlandığı yazılım, genel özellikleri bakımından karşılaştırıldığında YADE programı ile benzerlikler göstermektedir. Ancak YADE 'ye göre daha basit bir komut sistemi içermektedir. Partiküller arasındaki bağların (kontak bağ veya paralel bağ) kopmasıyla yeni oluşan eklemler modellenmektedir ve hem

homojen, hem de homojen olmayan malzemelerin analizi yapılabilmektedir. Bu husus dikkate alındığında söz konusu programda bir kaya kütlelerinin mevcut eklemleriyle birlikte yenildiği ve sağlam kaya parçaları boyunca yeni eklem oluşumları veya mevcut eklemlerin devamlılığının ilerlemesi araştırılabilmektedir. Partiküllerin temas noktalarına etki eden normal ve makaslama kuvvetlerinin birbirine aktarılması ile oluşan davranış, Newton'un ikinci hareket yasasına dayanmaktadır. Bu yazılıma ait özellikler "Materyal ve Yöntem" bölümünde ayrıntıları ile verilmiştir.



BÖLÜM 2

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kulatilake ve ark. (2001), tek eksenli sıkışma altında, eklemli kaya kütlelerinin davranışlarının modellenmesinde PFC3D yazılımını kullanarak, eklemlerin yoğunluğunun, yöneliminin, boyutlarının ve sayılarının kaya kütlelerinin tek eksenli sıkışma dayanımına olan etkisini incelemişlerdir. Hem laboratuvar, hem nümerik analizlerin birlikte yürütüldüğü çalışmada eklem geometrisinin yenilme türünü (çekilmeye bağlı ayrılma, eklem yüzeyi boyunca kayma veya her ikisinin birlikte görüldüğü yenilme) kontrol ettiğini belirlemişlerdir.

Wang ve ark. (2003), PFC2D yazılımını kullanarak 48 m yüksekliğinde 60° eğim açısında şevler oluşturmuş ve her şeve 8 eklem setinden oluşan kaya kütleleri atamıştır. Eklem yoğunluğu %90, %70 ve %50 oranlarında değiştirilerek şev duraylılığı ve mekanik davranış incelenmiştir. Araştırmacılar çalışmalarında aynı özelliklere sahip kaya malzemeleri kullanmıştır. %90 süreksizliğe sahip kaya şevlerinde yaklaşık dairesel bir yenilme gözlenirken, %70 eklem yoğunluğunda ise devrilme ve kayma türü yenilme bir arada meydana gelmiştir. Bunun yanı sıra %50 eklem yoğunluğuna sahip kaya şevi duraylı kalmıştır.

Potyondy ve Cundall (2004), uniform olmayan, dairesel-küresel tanelerden oluşan sıkı kenetlenmiş kayaların modellenmesinde ayrık elemanlar yöntemine dayanan PFC2D ve PFC3D programlarını kullanmışlardır. Araştırmacılar Lac du Bonner granitlerinde yapılacak kazılarda malzemesinin nasıl bir davranış göstereceğini belirlemek için bu granit türünü temsil eden kaya örnekleri oluşturmuştur. Her bir kaya örneğine ait partiküllere ve partiküller arası bağlara mikroparametreler atanmıştır. Hazırlanan örneklerin iki eksenli, üç eksenli ve brazilian deneylerinde ve sıkışma etkisi altındaki davranışı incelenmiştir.

Cho ve ark. (2007), partiküllerin mikro özelliklerinden yola çıkarak makro ölçekte kayanın vereceği davranışı PFC yazılımı ile modellemiştir. Mikro ölçekteki özelliklerin belirlenmesi için araştırmacılar bir dizi Brazilian, tek eksenli ve üç eksenli sıkışma dayanımı deneyi yapmıştır. Kümeli partikül mantığı yöntemi ile kırılğan kayanın nonlineer yenilme zarfını elde etmişlerdir.

Hsieh ve ark. (2008), kumtaşlarının mikro özelliklerinden yola çıkarak makro ölçekli mekanik davranışı (tek eksenli sıkışma dayanımı ve Young's modülü) yorumlamaya çalışmıştır. Bağlı partikül modeli (tane partikülleri, matriks partikülleri ve poroz matriks partikülleri) ele alınarak yapılan çalışma sonucunda matriks partiküllerinin daha güçlü bağ dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.

Hadjigeorgiou ve ark. (2009), sert kayalarda yapılan düşey kazıların duraylılığını PFC ile incelemiştir. Özellikle yeraltı kazılarında yapı ile gerilmeler arasındaki etkileşiminin anlaşılmasında PFC'nin yararlı bir modelleme tekniği olduğunu savunmuştur.

Park ve Song (2009), bir kaya kütesinin makaslanma sonucunda göstereceği davranış üzerinde, eklemlerin geometrisinin ya da mikro özelliklerinin etkisini incelemek için PFC3D yazılımını kullanmıştır. Kontak bağ modelinin kullanıldığı eklem simülasyonunda, pürüzlülük katsayısı (JRC) ve dayanımının (JCS) kohezyon üzerindeki etkisi, içsel sürtünme açısı üzerindeki etkisinden daha yüksek çıkmıştır.

Wong ve Einstein (2009), yapay jips ve mermer örneklerinde eklemlenme ve eklemlerin birleşme davranışını laboratuvar deneyleriyle (sıkışma) incelemiştir. 9 farklı çatlak türü ve çatlak yönelimi belirlenen çalışmada, makro çatlaklar gelişmeden önce mermer örneklerinde beyaz lekelerin veya izlerin oluştuğu görülmüştür. Aynı süreksizlik özelliklerine sahip jips ve mermer örnekleri karşılaştırıldığında çekme çatlaklarının daha çok mermer örneklerinde geliştiği belirlenmiştir.

Alzo'ubi ve ark. (2010), bükülmeli devrilme mekanizmasında kaya malzemesinin çekme dayanımının etkisini UDEC ayırık elemanlar yazılımıyla modellemiştir. Ancak UDEC yazılımının tabakalı kayalarda meydana gelen bükülmeli devrilme mekanizmasında, kopmanın geliştiği lokasyonu tam kestiremediğini ve etki eden yükü olduğundan daha fazla hesapladığını belirtmiştir. Araştırmacılar aynı zamanda sağlam kaya malzemesinin içsel sürtünme açısının devrilme mekanizması üzerinde önemli bir etkisi olmadığını vurgulamıştır.

Esmaili ve ark. (2010), Kanada'daki Brunswick madeninde yapmış oldukları çalışmalarında eklemli kaya kütlelerinde temsili elemanter hacmini (REV) belirlemeye çalışmışlardır. PFC3D kullanılarak oluşturulan sentetik kaya kütlelerinin elastik modülü ve tek eksenli sıkışma dayanımına bağlı olarak REV değerleri belirlenmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda mühendislik projeleri için 7x7x14 m'lik boyutların kullanılması önerilmiştir.

Zang ve ark. (2011), tek eksenli sıkışma dayanımının örnek hacmiyle olan ilişkisini ele aldıkları çalışmalarında, ölçek etkisinin tek eksenli sıkışma dayanımı üzerindeki rolünü PFC ile modelleyerek belirlemeye çalışmıştır. Farklı boyutlardaki mermer örnekler üzerinde yapılan çalışmada, kaya kütesindeki eklemler, pürüzsüz eklem yöntemi (SJM) kullanılarak simüle edilmiştir.

Ivars ve ark. (2011), eklemli kaya kütesi davranışının mekanik olarak incelenmesinde, sağlam kaya için bağlı partikül modelini, eklem ağı için smooth-joint yöntemini (pürüzsüz-eklem sınırı modelini) kullanarak yapay kaya kütesi modelleri

oluşturmuştur. Görgül ilişkilerde bulunmayan özellikleri de (ölçek etkisi, anizotropi, kırılgenlik vb.) ele alarak yaptıkları çalışmada PFC yazılımı ile kaya kütlesi davranışının daha gerçekçi bir şekilde ortaya koyulduğunu belirtmişlerdir.

Bahrani ve ark. (2012), PFC2D yazılımında paralel bağ yöntemine göre kurulan tane tabanlı modelleri ele aldıkları çalışmalarında, laboratuvar verileri ile sayısal Brazilian ve tek eksenli sıkışma dayanım değerlerini karşılaştırmışlardır. Brazilian deneyi için paralel bağ kullanılarak kurulan modellerde sünümlü bir yenilme sonrası davranışı görülmüştür. Tanelerin çekme dayanımı azaltıldığında ise yenilme sonrası davranış daha kırılgen olmuştur. Ancak bu kez de σ_c değerleri oldukça düşük çıkmıştır. Yapılan çalışmalar tanelerin çekme dayanımının $\sigma_{\text{Brazilian}}/\sigma_c$ oranını doğrudan kontrol ettiğini göstermiştir. Araştırmacılar bu durumun çekme dayanımının paralel bağ özelliklerine bağlı olmasından kaynaklandığını belirtmiştir. σ_t/σ_c oranının son derece düşük olarak elde edildiği sonuçlar, kırılgen kayaçların davranışlarının modellenmesinde paralel bağa dayalı tane modellerin gerçeği iyi yansıtmadığını göstermiştir.

Scholtes ve Donze (2012), Yade yazılımını kullanarak kaya kütlesinin dayanıma ve bulunduğu mevcut gerilim koşullarına bağlı olarak, sağlam kayadaki eklemlenmeyi ve eklemlerdeki yenilmeyi modelleyerek kaya kütlesi davranışını incelemiştir. Kaya şevleri için yapılan bu çalışma ile bir kaya kütlesindeki yayılımcı yenilme (mevcut süreksizlerin deformasyonu, süreksizlik ucundaki gerilim yoğunluğu, yeni eklemlerin doğuşu, sağlam kayanın eklemlenmesi) hem sıkışma, hem de makaslama gerilmeleri altında modellenmiştir.

Bahaaddini ve ark. (2013), eklem yüzeyinin pürüzlülüğünün, eklemlerin makaslama davranışı üzerindeki etkisini PFC2D ayırık elemanlar koduyla (bağlı partikül modeli, BPM; temas bağ ve paralel bağ) araştırmışlardır. Kumtaşları üzerinde yapılan deneylere (tek eksenli sıkışma dayanımı, poisson oranı ve elastisite modülüne) göre paralel bağ modelinde kullanılacak olan mikro mekanik özellikler kalibre edilmiştir. Elde edilen sonuçlar yüksek makaslama yerdeğiştirmelerinde bu yöntemin partikül kenetlenmesinden dolayı iyi bir yaklaşım olmadığını göstermiştir. Araştırmacılar eklem yüzeyinin karşılıklı iki tarafında da bulunan partiküllerin temas noktalarına etkiyen kayma yüzeyleri için smooth-joint yönteminin daha etkili olduğunu belirtmiştir.

Bidgoli ve ark. (2013), UDEC yazılımını kullanarak yapmış oldukları eklemlili kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon özelliklerinin nümerik modellerle belirlenmesini amaçladıkları çalışmalarında, farklı yükleme koşullarında kütle davranışını test etmişlerdir. Sonuçlar, ilgili gerilim aralığının üzerinde eklemlili kayanın dayanım ve deformasyon davranışının nonlinear olduğunu göstermiştir. Yanal basıncın artmasıyla eklemlili kayanın

dayanımı artmakta ve deformasyon davranışı elasto-plastik bir şekle (deformasyon sertleşmesi/strain hardening) dönüşmektedir. Genel olarak eklem sisteminin geometrisinin yanı sıra ayrı ayrı her bir eklem mekanik davranışının da dayanım üzerinde etkisi olduğunu belirten araştırmacılar, Mohr Coulomb ve Hoek-Brown yenilme kriterinin performansını da test etmişlerdir. H-B kriterinin doğrusal olmayan yenilme zarfının eklem sisteminin geometrisinin ve gerilim koşullarının modellenmesinde daha uygun olduğu sonucuna varmışlardır.

Chiu ve ark. (2013), eklemli kaya kütlelerinin anizotropik davranışı için PFC3D programı ile desteklenen smooth-joint modelini modifiye etmiştir. Eklem yüzeyi üzerindeki pürüzlülük açısı ve normal gerilme arasındaki ilişkiyi inceleyen araştırmacılar, paralel bağ (taneler arasındaki çimento) ve smooth-joint (eklem yüzeyindeki kayma etkisi) modelinin performansını test etmiştir. Jips, kum ve su karışımı ile oluşturulan yapay kaya kütleleri üzerinde benzer boyutlara ve şekillere sahip yapay eklemler geliştirilmiştir. Bu örnekler üzerinde test edilen laboratuvar deneylerinin sonuçları ile nümerik modeller karşılaştırıldığında Yang ve ark. (1998) tarafından önerilen 3 çeşit yenilme biçimine göre (çatlama, kayma ve karma tipi yenilme) smooth-joint modelin deney sonuçlarıyla son derece uyumlu olduğu belirlenmiştir. Her ne kadar araştırmacılar pürüzlülük etkisini dikkate alsalar da, kurdukları model gerçek eklem geometrisi ve pürüzlülüğüne dayanmamaktadır. Bu nedenle de araştırmacılar daha kapsamlı bir çalışmanın yapılmasını önermiştir.

Camones ve ark. (2013), kaya şevlerinde gelişen basamaklı yenilme mekanizmasında, mevcut çatlaklardaki ilerlemeyi veya yeni süreksizlik oluşumları ile süreksizlerin birleşme sürecini ayrık elemanlar yöntemine dayanan PFC2D ve 3D ile araştırmıştır. İki eksenli ve üç eksenli laboratuvar deneylerinde bir çatlakın oluşması ve birleşmesini modelleyerek, sonuçları Jennings (1970) 'in analitik sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Araştırmacılara göre Jennings limit denge yöntemi, eklemlerin aynı düzlem üzerinde bulunması koşullarında güvenlik katsayısı açısından oldukça tutucu sonuçlar üretmektedir. Ayrık elemanlar yöntemine dayalı PFC gibi nümerik yazılımların mikro-mekanik açıdan kaya kütlesi gibi süreksiz bir ortamın modellenmesinde, literatürdeki yöntemlere göre çok daha avantajlı olduğunu belirtmişlerdir.

Debecker ve Vervoort (2013), dayanım değerinde yüksek bir anizotropi gösteren sleytlerde, eklemlerin davranışını araştırmıştır. Dikdörtgen ve disk şekilli örnekler üzerinde yaptıkları laboratuvar sonuçları, UDEC 'de yapılan nümerik sonuçlarla karşılaştırılmış ve şiştözite düzlemine bağlı olarak etki eden yük sonucu eklemlerin nerede geliştiği belirlenmeye çalışılmıştır. Eğimin 20° 'ye kadar olduğu açılarda eklemler

hem şiştözite yönünde, hem de diğer yönlerde gelişmektedir ve yenilme makaslama yenilmesi şeklindedir. Eğim 80° 'den büyükken daha çok şiştözite yönünde gelişen çatlaklar oluşmakta ve çekme yenilmesi gerçekleşmektedir. Eğim $30-80^\circ$ arasında ise şiştözite yönünde bir veya iki çatlak gelişmiş ve örnekler makaslama yenilmesine maruz kalmıştır.

Liu ve Koyi (2013), şevlerde meydana gelen yenilme hareketinde, bir zayıflık düzleminin varlığının ve bunun yerinin, yöneliminin ve boyutlarının etkisini PFC2D ile araştırmışlardır. Bir duraylı ve 2 adet duraysız şev örneği üzerinde yapılan çalışmalar, yönelimin ve kalınlığın deformasyon üzerinde doğrudan etkili olduğunu gösterirken, zayıflık zonunun yeri ise yenilme üzerinde önemli sonuçlar doğurmamıştır. Bunun yanısıra yüksek makaslama dayanımına sahip olan şevlerde sadece zayıflık zonunun varlığı duraylı şevlerin yenilmesine yetmemektedir.

Sternik (2013), şev stabilitelerini hesaplamada gravite artırma ve dayanım azaltma yöntemini sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırmıştır. Araştırmacı, Mohr-Coulomb yenilme kriterinin kullanılması durumunda güvenlik katsayılarının oldukça yüksek çıktığını belirtmiştir.

Bahrani ve ark. (2014), kohezonu zayıf Wombeyan mermeri ile sağlam mermerin yenilme moduna geçişteki gerilim-deformasyon davranışını ve mikro çatlakların gelişimini karşılaştırmışlardır. PFC2D ile yapılan nümerik çalışmalarda artan gerilmeye bağlı olarak taneli veya kohezonu zayıf olan mermer örneklerinde kenetlenmenin daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Bidgoli ve Jing (2014), eklemli kaya kütlelerinde, eklem sistemlerinin non-uniform ve düzensiz oluşuna bağlı olarak dayanım ve deformasyon davranışlarında anizotropi oluşturduğunu belirtmiş ve arazi verilerine dayalı 2 boyutlu ayırık eklem ağı modelleriyle dayanım ve deformasyon davranışlarını nümerik olarak değerlendirmiştir. Elastik deformasyon parametrelerinde ve yenilme zarflarında (dayanım) gözlenen anizotropinin, aksenal yüke ve yanal basınca bağlı olarak değiştiğini vurgulamışlardır. Mühendislik açısından güvenli yapıların oluşturulmasında yerinde gerilmeler yönünde kaya kütlelerinin dayanım ve deformasyon özelliklerinin dikkate alınması gerektiğine dikkat çekmiştir. Araştırmacılar uzunluğu daha fazla olan 30° - 90° ve 150° açılı eklemlerin (uzunluk 2 m vb.) dayanım ve deformasyon anizotropisinde daha etkili olduğunu belirtmiştir.

Hashemi ve ark. (2014), zayıf çimentolu formasyonlarda açılan sondaj kuyularının duraylılığını inceledikleri çalışmalarında, partiküller arasındaki bağların zayıf olması halinde kuyuya doğru bir hareketin meydana geldiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılara göre, PFC3D kullanarak yaptıkları modellerinde kuyu çevresinde oluşan yerinde

gerilmeler ve su akışı, kum taneleri arasındaki bağları (çimentolanmayı) kopararak yenilmeye neden olmaktadır. Sonuçların, daha önce yapılan çalışmalarla (O'Sullivan, 2011; Zhu ve ark., 2007; Cundall ve Strack, 1979a) uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Lambert ve Coll (2014), PFC3D yazılımını kullanarak oluşturdukları eklemler için, smooth-joint modelini temel almış ve eklem yüzeyinin her iki tarafında bulunan partiküller arası etkileşimi tanımlayarak pürüzlülük etkisini araştırmıştır. Eklem yüzeyinin pürüzlülük durumunun kaya kütlesi dayanımı üzerindeki etkisini modellemiştir.

Lisjak ve Grasseli (2014), kaya kütlelerinde eklemlenme mekanizmasının simülasyonunda kullanılan ayırık elemanlar ve hibrid (melez) sonlu-ayırık elemanlar modelleme tekniklerini ele aldığı çalışmada her bir yazılıma ait kodun temel prensiplerini özetlemiştir. Özellikle yeraltı kazılarında eklemlenmeye veya eklem yayılımına bağlı olarak oluşan deformasyon gelişiminin simülasyonunu gerçekleştirdiği çalışmada PFC, Yade, UDEC, DDA ayırık elemanlar kodları ile, Hibrid sonlu-ayırık eleman yönteminden ELFEN, Y-Geo kodlarının uygulama alanlarını özetlemiştir. Değişen gerilim koşulları altında kaya yenilme davranışını modelleyen bu tür kodların, hangi ortamlarda veya koşullarda daha verimli sonuçlar üretebileceğini araştırmıştır. Araştırmacılar partikül bazlı nümerik modelleme yöntemlerinin eklemli kaya kütlesi davranışlarının modellenmesinde daha etkili sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Lu ve ark. (2014), Tayvan'da depremler ve aşırı yağışlar sonucu oluşabilecek heyelanların modellenmesinde PFC3D'den yararlanmışlardır. Yazılımın, gözenek suyu basıncının artmasından dolayı makaslama dayanımında meydana gelen azalmalar gibi çok kompleks mekanizmalarının modellenmesinde bazı sınırlamalar oluşturduğunu belirtmişlerdir. Ancak bu yazılımla elde edilen simülasyonlar, özellikle Lushan sıcak su bölgesinin olası bir heyelanda önemli ölçüde tahribata uğrayacağı hakkında bir ön değerlendirme bilgisi vermiştir. Ayrıca yapılan sayısal çalışmalar, heyelanlar için kritik sürtünme katsayılarının belirlenmesine olanak sağlamıştır.

Pain ve ark. (2014), Garhwal Himalaya'da bulunan bir karayolu üzerindeki 3 adet şevin sonlu elemanlar duraylılık analizini 2 farklı modelleme tekniğiyle gerçekleştirmiştir. Sürekli (Phase²) ve birleştirilmiş sürekli-arayüzlü olarak ele aldıkları modellerinde her yıl yaşanan aşırı yağışlar sebebiyle tetiklenmiş şev duraysızlıklarını araştırmışlardır. Genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme ölçütünü kullanarak belirledikleri kaya kütlesi makaslama dayanım parametreleri ile yapılan şev analizleri sonucunda sürekli-arayüzlü nümerik modellerin kaya şevlerinin yenilme mekanizmalarını daha iyi bir şekilde ortaya koyduğu belirlenmiştir.

Wong ve Wu (2014), kaya şevlerindeki progresif yenilmeyi incelemek için nümerik

manifold yöntemini (NMM) kullanmış ve sonuçları Jennings (1970) ve Jeagar (1971) limit denge yöntemleriyle karşılaştırmıştır. Elde edilen güvenlik katsayıları, aynı düzlem üzerinde ve sürekli olmayan (kesikli) eklemler içeren şevlerde Jennings yöntemiyle benzer sonuçlar verirken, basamaklı (aynı düzlem üzerinde olmayan) ve kesikli eklemler içeren şevlerde ise Jeagar modeline yakın sonuçlar üretmiştir. Devamlı eklemlerle kesilen şev modellerinde ise güvenlik katsayıları Jennings yöntemi ile son derece uyumlu çıkmıştır.

Yang ve Huang (2014), eklemlerli kaya kütleleri için PFC2D yazılımında Brazilian deneyini simüle etmiş ve ortalarına birer çentik atılarak hazırlanan disk şeklindeki örnekler üzerinde, eklemin ve çentiğin yönelim açısının o örneğe ait çekme dayanımı ve yenilme mekanizması üzerindeki etkisini incelemiştir. Eklemler açısı arttığı takdirde, kaya kütlelerinin çekme dayanımı nonlineer bir değişim göstermektedir.

Yang ve ark. (2014), birbirine paralel olmayan fisürler içeren kırmızı kumtaşlarının tek eksenli sıkışma altında nasıl bir davranış gösterdiğini PFC2D yazılımını kullanarak araştırmışlardır. Fisür açısı 90° olduğu zaman pik dayanım ve elastisite modülü artmakta, ancak yatay rijitlik oranı bu açıda en düşük değerine ulaşmaktadır. Esas çatlakların birleşme sürecinin araştırıldığı çalışmada eksenel deformasyonun artmasıyla birlikte çekme çatlaklarının makaslama çatlaklarından sayıca daha fazla olduğu belirlenmiştir. Araştırmacılar çatlakların oluşumunun, ilerlemesinin ve birleşmesinin fisürlerinin açısına bağlı olduğunu belirtmişler ve çatlakların pik dayanımdan daha sonra oluştuğunu gözlemlemişlerdir.

Huang ve ark. (2015), PFC2D yazılımını kullanarak basamaklı şev yenilme modelini incelemiştir. Devamlı olmayan (kesikli) eklemler içeren şevlerde üç tür kaya köprüsü yenilmesi gözlemlemiştir. Bunlar 90° 'den küçük basamak açısında oluşan makaslama yenilmesi, 90° 'lik basamak açısında meydana gelen çekme yenilmesi ve 90° 'den küçük ancak nispeten daha uzun kaya köprüsü aralıklarında gelişen birleşik çekme-makaslama yenilmesi şeklinde tanımlanmıştır.

Liu ve ark. (2015), parçalanmış kaya agregalarının mekanik davranışını PFC3D yazılımı ile nümerik olarak incelemiş ve malzemenin makaslama dayanımının, normal gerilmenin artmasıyla arttığını belirtmiştir. Araştırmacılar düşük normal gerilmelerde yüksek hacimsel genişlemenin ve düşük sıkışma miktarının meydana geldiğini gözlemlemiştir. Agregalardaki tane boyunun artması, sıkışmadaki oranını artırırken, sürtünme açısını ise azaltmaktadır.

Scholtes ve Donze (2015), ayrık elemanlar yöntemine dayanan Yade yazılımı ile tasarladıkları şevlerde devamlılık, rijitlik ve sürtünme açısının etkisini araştırmıştır. Gelişigüzel eklemler 35 MPa tek eksenli sıkışma dayanımı, 3.5 MPa çekme dayanımı olan

kaya şevine dağıtılmıştır. Sonuçlar eklem rijitliğinin yenilmenin başlama yerini etkilemediğini, sürtünme açısının ise doğrudan şevin dayanımını kontrol ettiğini göstermiştir.

Sierra ve ark. (2015), düzlemsel kayma mekanizmalarında kaya köprüsü aralıklarının etkisini ayırık elemanlar yöntemiyle araştırmış ve sonuçları Jennings (1970)'in limit denge yöntemiyle karşılaştırmıştır. Elde edilen bulgular, Jennings limit denge yönteminin yalnızca düşük açılı makaslanan yenilme yüzeyleri (30° gibi) için uygulanabilir olduğunu göstermiştir. Daha yüksek eğim açılı eklemlere sahip şevlerde (örneğin 50°) yenilmenin, çekme ve makaslama yenilmesinin bir kombinasyonu şeklinde geliştiğini ve Jennings yönteminin, kritik eşdeğer kohezyonu olduğundan daha düşük değerlendirdiğini belirtmiştir.

Zhang ve ark. (2015), madencilik yöntemlerinden biri olan oda topuk yönteminde, topukların dayanım ve deformasyon davranışlarını PFC3D kullanarak (sentetik kaya kütleleri üzerinde) nümerik analizlerle araştırmışlardır. Araştırmacılar düşük devamlılıktaki dikey eklemlerin olduğu kaya topuk modellerinin daha kırılğan bir davranış sergilediğini, eklemlerin eğim kazanması ve devamlılıklarının artmasıyla daha sünümlü bir davranış gösterdiklerini belirtmişlerdir.

Duriez ve ark. (2016), tek eksenli sıkışma dayanımı altında kayalarda meydana gelen eklem ilerlemesini ayırık elemanlar yöntemiyle modellemiştir. Sönümlenme katsayısı ve ayırık eleman boyutunun, simülasyonu yapılan dayanım parametresini etkilediğini ancak elastik özellikler üzerinde bir değişiklik oluşturmadığını belirtmiştir. Eklemlerin sürtünme açısındaki artış, yanal eklemlenmeden ziyade, daha dağılan bir eklem paterninin oluşmasına neden olmuştur.

Bahaaddini ve ark. (2016), pürüzlü eklem yüzeylerinde makaslanma sırasında meydana gelen parçalanmayı nümerik ve laboratuvar çalışmalarıyla araştırmıştır. Farklı normal gerilim koşulları için yapılan makaslama deneyleri laboratuvardaki yapay örneklerin yanı sıra PFC yazılımı kullanılarak da modellenmiştir. Makaslama mekanizması normal gerilim ve pürüzlülük açısı ile kontrol edilmektedir. Düşük pürüzlülük açılarında veya düşük normal gerilim seviyelerinde pürüzlü yüzey boyunca kayma meydana gelmektedir. Buna karşılık yüksek pürüzlülük açılarında veya yüksek normal gerilim seviyelerinde pürüzlülükler arasında çekme çatlakları gelişmekte, makaslanma kesilmekte ve pürüzlülükler parçalanmaktadır.

Liu ve ark. (2016), PFC2D kullanarak tek eksenli sıkışma altında, farklı eğim açılına sahip çatlaklar-eklemler içeren kömür örneklerinin mekanik davranışını incelemiştir. Eklemlerin eğim açılarının artması, doruk eksenel deformasyonu

arttırmaktadır. Benzer şekilde yanal doruk deformasyon da eklem eğim açısının artmasıyla artmaktadır. Ancak bu durum eğim açısı $\theta = 45^\circ$ olduğu koşullarda geçerli olmamaktadır. Araştırmacılar, varolan ilk eklemlerin eğim açısına bağlı olarak, 11 tür yeni gelişen eklem ve 3 tip eklemlenme (crack initiation) modu belirlemişlerdir.



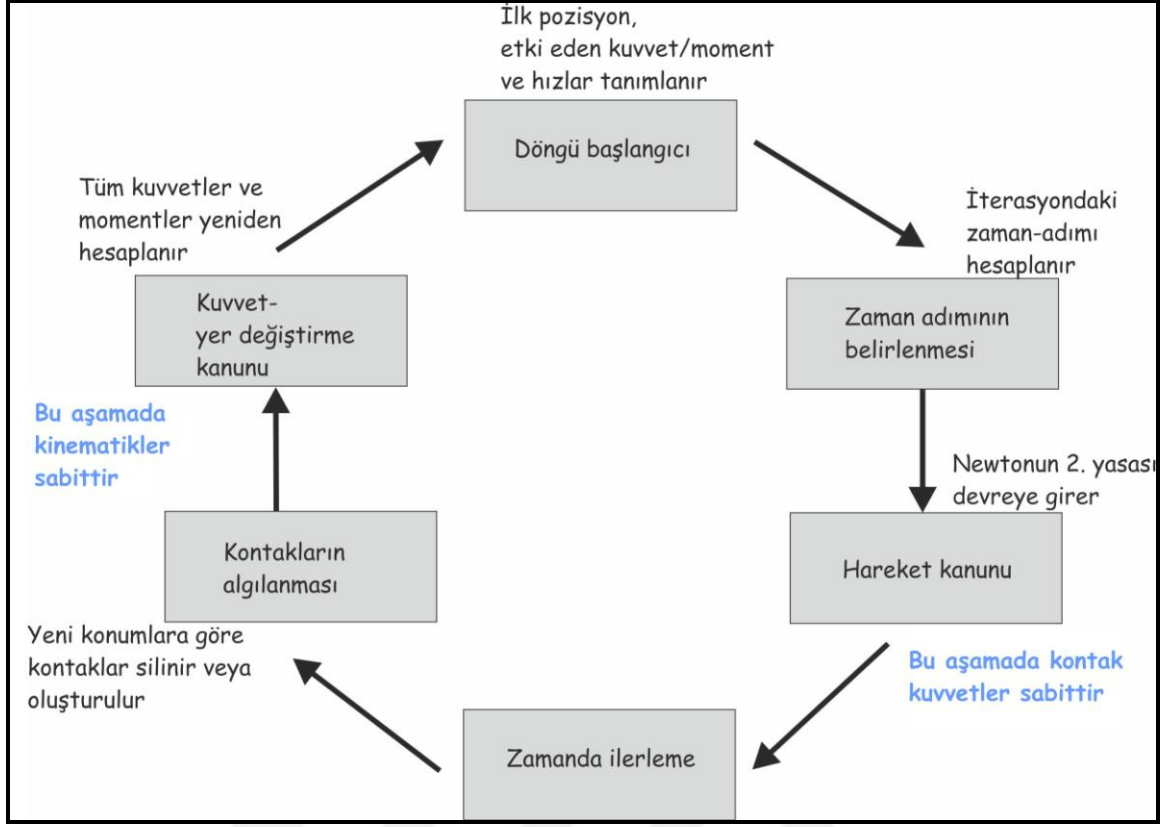
BÖLÜM 3

MATERYAL VE METOT

Araştırma çalışmalarının yürütülmesinde kullanılan Particle Flow Code yazılımı ayrık elemanlar metoduna dayanan bir yazılımdır. Bu yazılımda sağlam kaya malzemesi birbirine bağlı çok sayıda sonlu dairesel partikülden oluşur (Bonded-Particle Model, BPM). Belirli bir poroziteyle partiküllerin Gauss dağılımına göre yerleşmesi sağlanır. Partiküller arasında normal ve makaslama rijitlik parametrelerine sahip (k_n ve k_s) elastik yayların olduğu kabul edilir. Böyle bir malzemede yenilme partiküller arasındaki bağların kopmasıyla simüle edilmektedir. PFC'de tanelerin birbirine bağlanmasını sağlayan lineer, kontak bağ, paralel bağ ve flat-joint olmak üzere 4 adet kontak model veya bağ modeli vardır. Bunlardan lineer model granüler malzemeler (zemin gibi) için kullanılırken, diğer modeller ise kaya benzeri malzemeler için kullanılmaktadır. Smooth-joint model ise kontak bağlı, paralel bağlı ve flat-joint ile oluşturulmuş malzemelerde eklem, fay vb. eklemlerin oluşturulması amacıyla kullanılan bir yöntemdir (Ivars ve ark., 2008). Genel olarak bağlı partikül modeli için (BPM) şu varsayımlar kabul edilir (Potyondy ve Cundall, 2004):

- i. Partiküller küresel veya dairesel olup sonlu bir kütleyle sahiptir.
- ii. Partiküller birbirlerinden bağımsız olarak hareket edebilir, yerdeğiştirebilir veya dönebilir.
- iii. Partiküller yalnızca kontaklar boyunca temas halindedir. Kontaklar iki partikülden oluşur.
- iv. Partiküller birbiri üzerine bindirebilirler ve temaslar çok küçük bir alanda oluşur.
- v. Bağların rijitliği kontaklarda gelişir ve bağlı bir kontaktaki partiküller bindirmemelidir.
- vi. Her kontakta veya temasta genelleştirilmiş kuvvet-yerdeğiştirme kanunları geçerlidir.

Ayrık elemanlar yönteminde partiküller arasında dinamik bir davranış vardır. Bu davranış zaman-adımı (time-stepping) algoritmasıyla tanımlanır (Şekil 3.1). Hız ve ivme her bir zaman adımında sabittir. Bu dinamik yapı, kinetik enerjinin sıfırlanması için bir sönümlenme sürecine ihtiyaç duyar (Potyondy ve Cundall, 2004). α , sönümlenme katsayısı olmak üzere bu tez çalışmasındaki analizlerde 0.7 olarak kullanılmıştır. Bu değer, tez çalışması sırasında yapılan iterasyonlar sonucunda kayalar için en uygun sönümlenme sayısı olarak seçilmiştir.



Şekil 3.1. PFC'de hesaplama döngüsü (Itasca, 2015)

PFC 'nin temel aldığı hareket kanunu (Newton'nun ikinci hareket kanunu) Eşitlik 3.1 ve 3.2 'de gösterilmiştir. Buradaki F_c toplam kontak kuvveti, F_a etkiyen kuvvetler, m kütle, g gravite, \dot{p} momentin zamana bağlı türevi, \ddot{x} ivme, M_c toplam kontak momenti, M_a etki eden moment, \dot{L} açısal momentin türevi, I eylemsizlik tensörü, \dot{w} açısal ivme, $(w+L)$ eylemsizlik tensörünün zamana bağlı türevinden kaynaklanan katkı olarak tanımlanmaktadır (PFC klavuzu).

$$F_c + F_a + mg = \dot{p} = m\ddot{x} \text{ (yer değiştirme)} \quad (3.1)$$

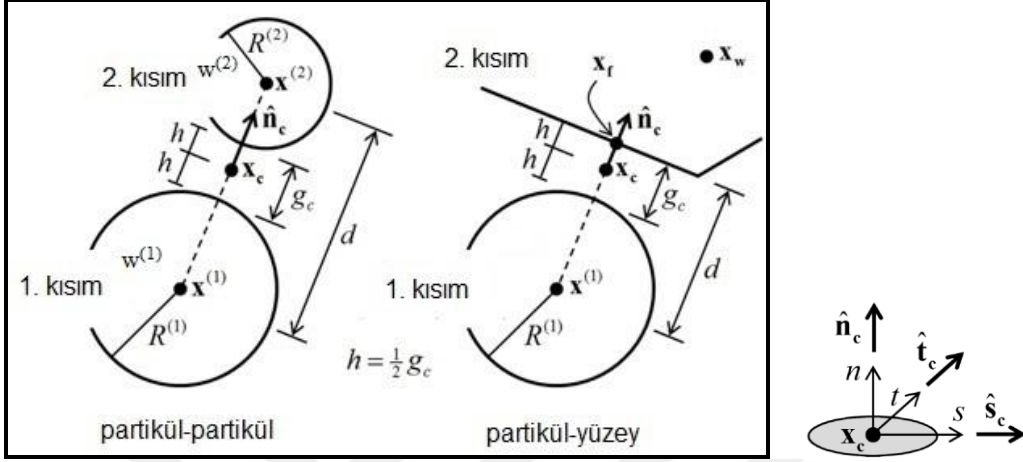
$$M_c + M_a = \dot{L} = I\dot{w} + w \times L \text{ (rotasyon)} \quad (3.2)$$

Kontak mekaniğinde tüm deformasyonlar, rijit partiküller arasındaki kontaklarda meydana gelir. Kontak modellerinin asıl rolü kontak lokasyonundaki harekete göre oluşan kuvvetleri ve momentleri güncellemektedir. Şekil 3.2 referans olarak alındığında partiküller arasındaki yerdeğiştirme ve rotasyon sırasıyla Eşitlik 3.3 ve 3.4 'teki gibidir.

$$\delta = \dot{x}^{(2)} + w^{(2)} \times (x_c - x^{(2)}) = -\dot{x}^{(1)} + w^{(1)} \times (x_c - x^{(1)}) \quad (3.3)$$

$$\theta = w^{(2)} - w^{(1)} \quad (3.4)$$

Bu ilişkilerde x_c kontak düzleminin yerini, n_c ise bu düzlemin normal bileşenini göstermektedir.



Şekil 3.2. Partikül-partikül ve partikül-duvar arayüzü (Potyondy, 2015)

3.1. Lineer Yöntem

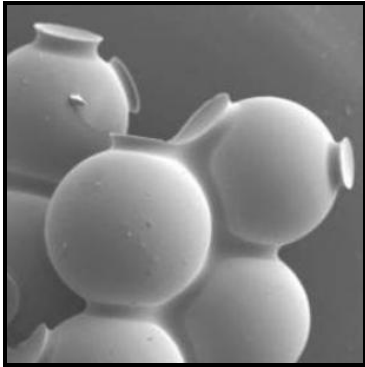
Lineer tabanlı yöntemler lineer, lineer kontak bağ, lineer paralel bağ olmak üzere üç çeşittir. Bu yöntemler yüzey-partikül ve partikül-partikül arası olmak üzere 2 tip temas durumunun atanmasında kullanılır. Genellikle yüzeylerle sınırlanmış bir sistemin yüzey-duvar ilişkisinin sürtünmesiz ve lineer olması tercih edilir. Bu nedenle ilerleyen bölümlerde bahsedilecek olan tek eksenli sıkışma dayanımı, çekme dayanımı deneylerinde ve şevlerde, duvarların partiküllerle olan ilişkisi lineer yöntemle göre belirlenmiştir. Bu yöntemde kullanılan parametreler Bölüm 3.7 'de verilmiştir.

3.2. Lineer Kontak Bağ Yöntemi

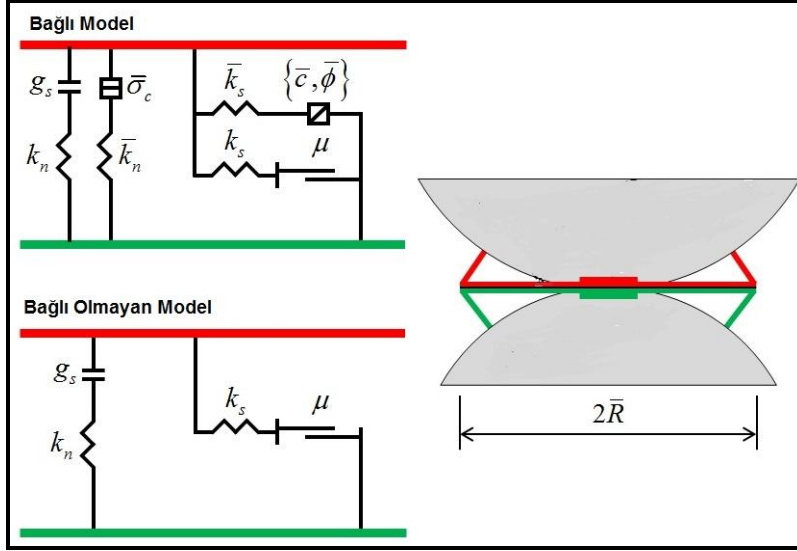
Bu yöntemde iki partikülün birbirine temas ettiği noktaya etki eden elastik yaylar vardır. Makaslama kuvveti, makaslama dayanımı tarafından kontrol edilmez, sadece çekme dayanımı, çekme kuvveti tarafından sınırlandırılır. Eğer normal kuvvetler, modelin çekme dayanımını aşarsa, bağlar kopar ve malzeme yenilir. Bunun yanı sıra makaslama kuvvetleri, makaslama dayanımını aşarsa, bağlar yine kopar, ancak makaslama kuvvetleri modelin sürtünme katsayısını ve normal kuvvetleri aşamaz. Böylece, normal kuvvetler hala sıkıştırıcı bir etki yapar.

3.3. Lineer Paralel Bağ Yöntemi

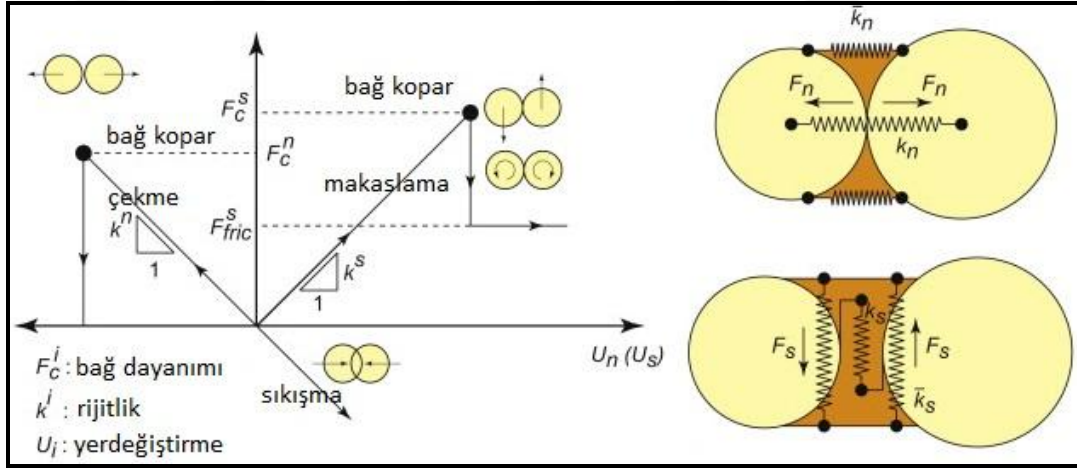
Lineer paralel bağ yöntemi, partiküller arasında sonlu boyutlardaki çimonta benzeri bir malzemenin mekanik davranışına dayanır. Paralel bağ bileşenleri, lineer bağ bileşenleriyle paralel olarak partiküller arasında elastik bir etki yapar (Şekil 3.4). Bu bağ yönteminde hem kuvvetlerin, hem de momentlerin aktarımı sağlanmaktadır. Elastik yaylardan oluşan paralel bağlar, iki partikülün birbirine değdiği veya temas ettiği kısımda, bir kesit alanı boyunca etki edecek şekilde konumlandırılmıştır. Kontak kısmındaki hareket, malzeme içerisinde normal ve makaslama gerilmeleri oluşturmakta ve bu gerilmelerin, bağ dayanımını aşması durumunda paralel bağlar kopmaktadır. Paralel bağ modeli iki ara yüzden oluşur. Bunlardan biri, kuvvetleri taşıyan lineer elastik ve sürtülmeli arayüz, diğeri ise hem kuvvet hem de momentleri taşıyan lineer elastik ve bağlı arayüzdür. Birinci arayüz lineer modelle aynıdır; rotasyona direnç gösteremez ve kaymaya başlar. İkinci arayüz paralel bağlı arayüzdür (Şekil 3.4 ve 3.5). Bu arayüz rotasyona direnç gösterir ve dayanım değeri aşılanaya kadar lineer elastik davranır. Dayanımı aşıldıktan sonra bağlar kopar ve bu durumda lineer modelle aynı şekilde çalışır. Özet olarak, yüklemeye birlikte birbiriyle etkileşim halinde bulunan ayrık elemanlar arasında kuvvetler oluşur ve her bir ayrık eleman için Newton'un ikinci hareket yasası devreye girer. Kuvvetlerin oluşturduğu ivme, zamana entegre olarak partiküllerin yeni pozisyonunu bulur. Potyondy (2015) genel olarak paralel bağla bağlanmış bir modeli, sentetik bir yapıştırıcıyla tutturulmuş cam boncukların mikro yapısına benzetmektedir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Paralel bağ yöntemine göre tutturulmuş partiküllerin mikro yapısı (Potyondy, 2015)



Şekil 3.4. Lineer paralel bağın davranışı ve reolojik bileşenleri (Potyondy, 2014)



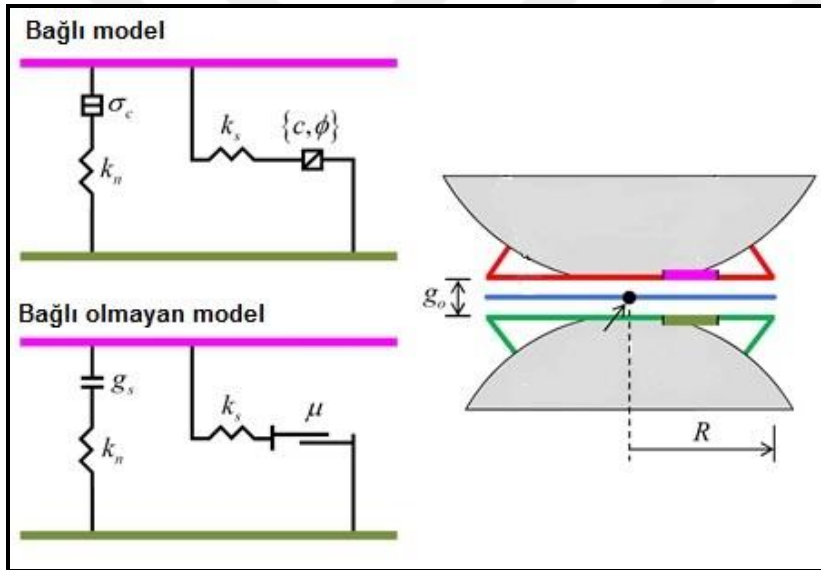
Şekil 3.5. Kuvvet ve yer değiştirmeye bağlı olarak gelişen yenilme türleri (Cho ve ark., 2007)

3.4. Flat-Joint Bağ Yöntemi

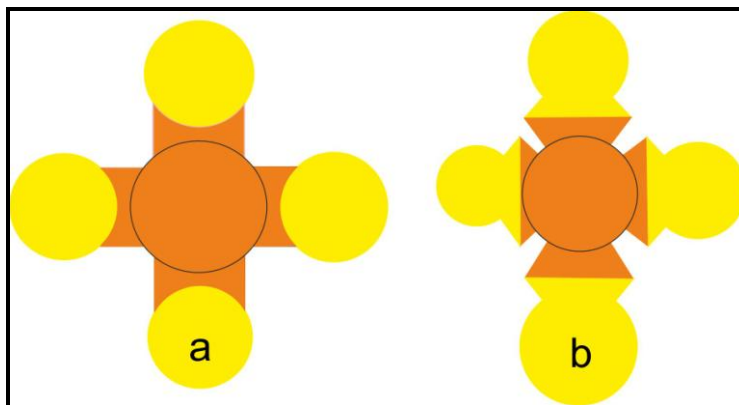
Kontak bağ modeliyle kurulan sistemlerde, yalnızca kuvvetler aktarılırken, paralel bağ ile kurulan modellerde ise hem momentlerin hem de kuvvetlerin aktarımı söz konusudur. Bu sebeple literatürdeki çoğu çalışmada paralel bağa göre kaya modelleri oluşturulmuş, ancak kaya malzemelerine ait tek eksenli sıkışma ve çekme dayanımlarının belirlenmesi için yapılan çalışmalar, paralel bağ ile kurulan modellerde σ_c/σ_t oranının oldukça düşük çıktığını göstermiştir. Oysaki bu oranın 10-20 arasında olması beklenmektedir. Ding ve Zhang (2014) bu oranın daha çok 3-7 arasında değiştiğini belirtmiştir. Bahrani ve ark. (2012), paralel bağlı modellerin kırılğan veya yüksek dayanımlı kayalar için uygun olmadığını vurgulamıştır. Bu durum köşeli tanelerin yuvarlak

partiküllerle temsil edilmesinden dolayı rotasyona karşı koyacak yeteri kadar direnç olmamasından kaynaklanmaktadır (PFC2D klavuzu). Potyondy (2012) bu sınırlamanın ortadan kalkması için tanelerin temas kısımlarını düz bir çizgiyle simüle ederek rotasyonun önlenileceğini önermiştir. Bu şekilde flat-joint kontak yöntemine göre kurulan kaya modellerinden gerçeğe uygun sonuçlar elde edilmiştir (Agramonte ve ark., 2014; Esmaili ve ark., 2015; Poulsen ve Adhikary, 2013; Bahrani ve ark., 2012 vb.).

Flat joint bağ kurulduğunda, yuvarlak taneler, köşeli partiküller gibi davranır (Şekil 3.7). Köşeli partiküller arasında bir arayüz oluşur ve bu arayüz bağlı veya bağlı olmayan elementlere ayrılır (Şekil 3.6). Her bağlı elementin kopmasıyla arayüz kısmi olarak parçalanır, her kopma durumu bir çatlığa işaret etmektedir. Eğer flat-joint kontağındaki yerdeğiştirme, flat joint çapından daha büyükse, böyle bir durumda partiküller arasındaki köşeli yüzler ortadan kalkar.



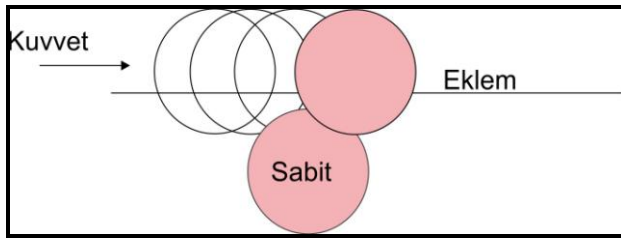
Şekil 3.6. Flat joint bağ modelinin reolojik bileşenleri (Potyondy, 2014)



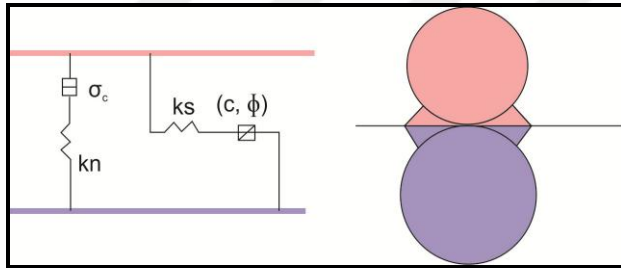
Şekil 3.7. Paralel bağ (a) ve flat joint bağ (b) modeli (PFC klavuzu)

3.5. Smooth-Joint Bağ Modeli

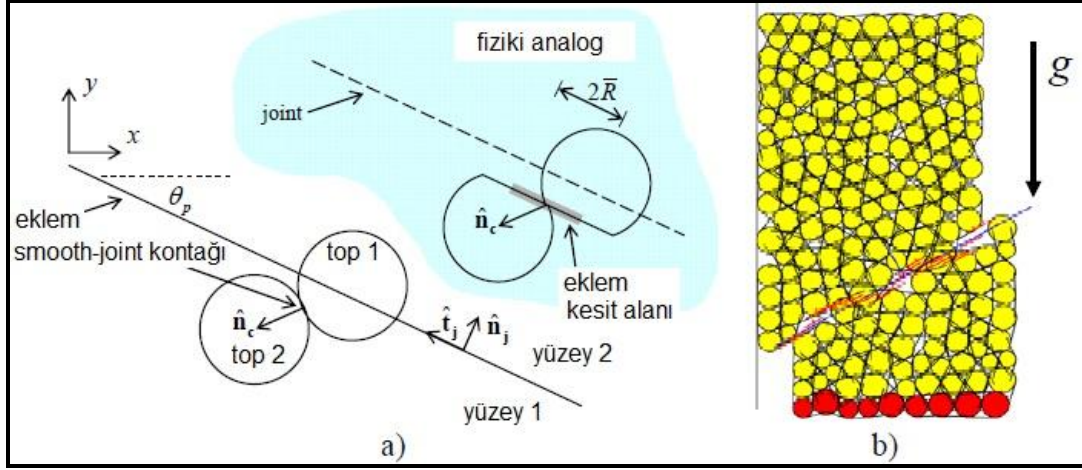
Ivars ve ark. (2008) tarafından geliştirilen ve bağlı partikül modeli (Potyondy ve Cundall, 2004) üzerine eklem özelliklerinin yerleştirilmesi sonucu şekillendirilmiş bu yöntem ile yenilme, sağlam ve birbirine bağlı partikül bölgeleri ve eklem yüzeyleri boyunca gerçekleşmektedir. Bu şekildeki bir sistem "sentetik kaya kütlesi metodolojisi" olarak tanımlanmıştır (PFC2D klavuzu). Pürüzsüz eklem modelinde, eklem yüzeyinin her iki tarafında yer alan partiküllerin birbirine temas ettiği noktalara kayma yüzeyleri atanır ve pürüzsüz eklem (smooth-joint) tarafından kesilen partiküller birbiri üzerine biner veya arasından geçer (Şekil 3.8 ve 3.9). Bu şekilde birbirlerinin etrafından dolanmazlar ve oluşabilecek ekstra pürüzlülükler engellenmiş olur (Şekil 3.10).



Şekil 3.8. Smooth-joint bağ modelin partikül hareketi (Itasca, PFC klavuzu)



Şekil 3.9. Smooth-joint bağ modelinin reolojik bileşenleri (Itasca, PFC klavuzu)



Şekil 3.10. a) Eklem geometrisi b) Gravite etkisi altında makaslanmaya uğrayan smooth-joint yüzeyi (Ivars ve ark., 2008)

3.6. Gravite Arttırma Yöntemi

Şevlerdeki yenilme mekanizmalarının incelenebilmesi için, öncelikle şevin yenilme anına ulaşması gerekmektedir. Bu amaçla limit denge analiz yöntemlerine başvurulmakta ve genel olarak bu yöntemler, kaymaya karşı koyucu kuvvetlerin kaydırıcı kuvvetlerle olan ilişkisine dayanmaktadır. Öyle ki şev tasarımlarında kullanılan güvenlik katsayısı değerleri bu yöntemlerden elde edilmektedir. Ayırık elemanlar gibi sayısal modelleme teknikleri, bu tür limit denge yöntemlerini bünyesine entegre edebilen yazılım algoritmalarında kullanılmaktadır. Özellikle dayanım azaltması (shear strength reduction, SSR) yaklaşımından yola çıkılarak, eklemlerle bölünen sitemde eklemlere ait kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) gibi makaslama dayanım parametrelerinde aşama aşama azalmaya gidilmekte ve malzemenin yenildiği andaki c ve $\tan\phi$ değerinin malzemenin ilksel makaslama dayanım parametrelerine oranından o şeve ait güvenlik katsayısı değeri elde edilmektedir. Ancak PFC yazılımında bu yöntem çalışmamış, limit denge analizlerinden elde edilen sonuçlarla PFC sonuçları karşılaştırıldığında oldukça büyük farklılıklar oluşmuştur. Bu nedenle bu çalışma kapsamında "gravite arttırma yöntemi" kullanılmış ve gerek şevlerin stabilite durumları, gerekse yenilme mekanizmaları bu prensibe göre analiz edilmiştir.

Gravite arttırma yöntemi genel olarak kritik yenilme yüzeyinin belirlenmesi için tüm malzeme özellikleri aynı kalmak koşuluyla, aşamalı olarak yer çekimi ivmesinin arttırılması prensibine dayanır. Her ne kadar doğal bir ortamda, gravite değeri değişmeyen, sabit bir parametre olsa da, modelleme veya simülasyona dayanan çalışmalarda bu tür sınırlamalar ortadan kalkmaktadır. Bir şevin duraylılığı, şevin yenildiği andaki gravite değerinin (g_0), şevin ilksel gravite değerine (g_i) olan oranı ile ifade edilmektedir (Li ve

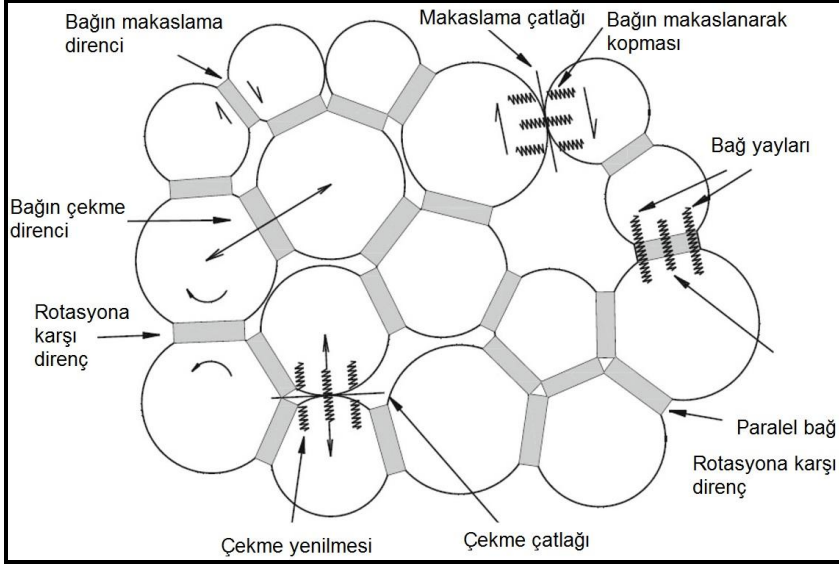
ark., 2009). Bu şekilde kritik yenilme yüzeyi de belirlenmiş olacaktır. Aşağıdaki bölümlerde verilen F parametresi, güvenlik katsayısından farklı bir olarak "gravite oranı" şeklinde dikkate alınmıştır.

3.7. Kullanılan Parametreler

Ayrık elemanlar yöntemine dayanan PFC'de, her bir partikülün bireysel etkileşimi, tüm sistem üzerine etkili olmakta ve dolayısıyla tanımlanan bir mikro özelliğe sahip olan her bir partikülün davranışı, tüm sistemin makro davranışını belirlemektedir. Bu açıdan ayrık elemanlar yöntemi ile kaya kütleleri gibi süreksiz ortamlarda, kaya malzemesi özelliklerinin ve eklem, çatlak veya tabaka-foliasyon düzlemi özelliklerinin tüm kütleyle olan etkisi ayrı ayrı izlenebilmektedir. Yukarıda bahsedilen paralel bağ ve smooth-joint bağ yöntemleri sırasıyla kaya malzemesi ve eklemlerin mikro özelliklerinin atanmasında kullanılmaktadır (Şekil 3.11). Aşağıdaki Çizelge 3.1'de kaya malzemelerinin modellenmesi için gerekli olan lineer ve paralel bağ yönteminin parametreleri ile eklemlerin modellenmesinde kullanılan smooth-joint yönteminin parametreleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kaya kütlelerinin oluşturulmasında kullanılan yöntemlerdeki parametreler

Lineer	Paralel Bağ	Smooth-Joint Bağ
Efektif modül, emod	Partikül çapı	Normal rijitlik, sj_kn
Rijitlik oranı, krat	Yoğunluk	Makaslama rijitliği, sj_ks
Sürtünme katsayısı	Efektif modül, emod	Sürtünme katsayısı, sj_fric
	Rijitlik oranı	Kohezyon, sj_coh
	Çekme dayanımı, pb_ten	Çekme dayanımı, sj_ten
	Kohezyon, pb_coh	
	Sürtünme açısı, pb_fa	
	Porozite	



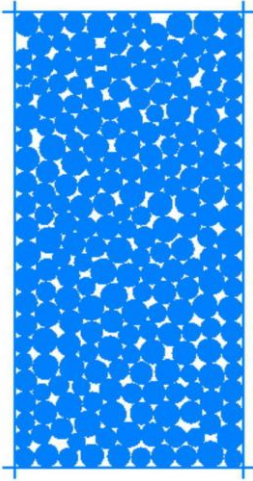
Şekil 3.11. Paralel bağ ile tutturuluş bir kayanın mikro görünümü (Huang ve ark., 2015)

BÖLÜM 4

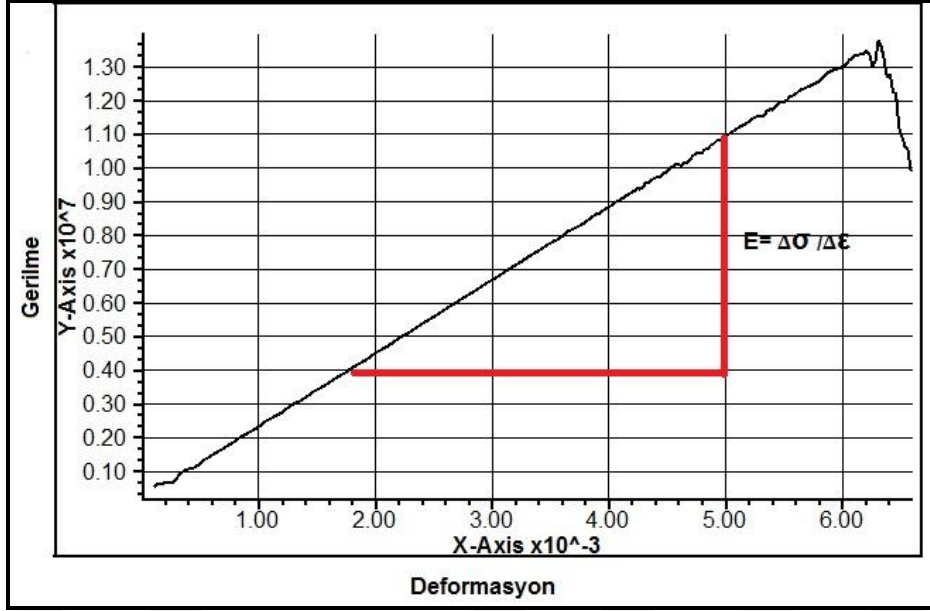
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Kaya Malzemelerinin Oluşturulması

Kaya malzemeleri Pontyond ve Cundall (2004) tarafından önerilen bağlı partikül modeli (bonded particle model) prosedürlerine göre hazırlanmıştır. 4 m uzunluğunda ve 2 m çapında ölçek etkisi dikkate alınarak hazırlanan örneklerin kaya malzemesi özellikleri, paralel bağ yöntemine göre belirlenmiştir (Şekil 4.1). Efektif modül, yoğunluk, rijitlik, sürtünme katsayısı, çekme dayanımı, kohezyon vb. bir dizi mikro parametreye sahip her bir partikül bir araya gelerek kompleks kaya davranışlarının modellenmesine olanak sağlamaktadır (Çizelge 4.1). Bu özelliklerle tasarlanmış örnekler tek eksenli sıkışma dayanımı ve direkt çekme dayanımı deneylerine tabi tutulmuş ve makro-mekanik parametreleri (σ_c , σ_t , E) belirlenmiştir (Çizelge 4.2 ve Şekil 4.3). Her bir örneğe ait elastisite modülü tek eksenli sıkışma dayanım deneyinden elde edilen gerilim-birim deformasyon eğrisinden belirlenmiştir (Şekil 4.2). Bu makro özellikler, Hoek-Brown (Hoek ve ark., 2002) yenilme ölçütüne göre 'm' parametresinin 6.03, 5.5 ve 10 değerlerine karşılık gelmekte ve bu değerler (σ_c , σ_t , E dikkate alınarak) Örnek 1, 2 ve 3 için sırasıyla kireçtaşı, kiltası ve jips tipi kaya türleriyle eşleşmektedir (Marinos ve Hoek, 2000).



Şekil 4.1. Gauss dağılımına göre yerleşmiş 8-12 cm çaplı partiküller



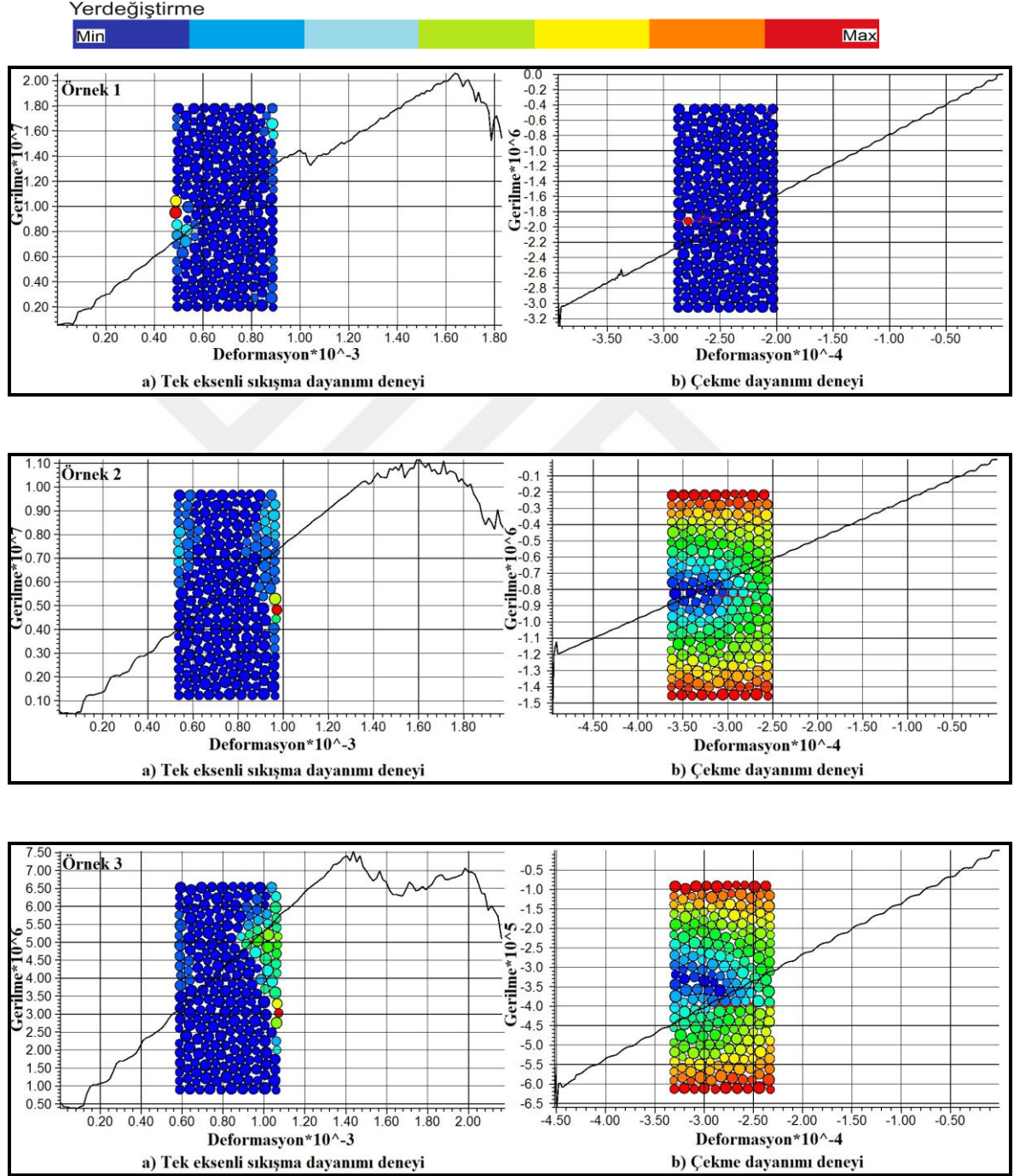
Şekil 4.2. Gerilim-deformasyon eğrisinde elastisite modülü belirleme

Çizelge 4.1. Kaya malzemelerinin paralel bağ yöntemine göre belirlenen mikro mekanik özellikleri

Özellik	Örnek 1	Örnek 2	Örnek 3
Partikül çapı (m)	0.08-0.12	0.08-0.12	0.08-0.12
Yoğunluk (kg/m ³)	2500	2500	2500
Efektif modül emod (GPa)	8.3	4.0	3.0
Rijitlik oranı (krat)	2.2	1.5	1.8
Çekme dayanımı, Pb_ten (MPa)	5	3	2
Kohezyon, Pb_coh (MPa)	10	6	4
Sürtünme açısı, Pb_fa, (°)	20	20	20
Porozite	0.1	0.1	0.1
Damping oranı	0.7	0.7	0.7
Lineer Kısım			
Efektif modül, emod (GPa)	20	8.5	7.0
Rijitlik oranı, krat	2.2	1.7	1.9
Sürtünme katsayısı	0	0	0

Çizelge 4.2. Kaya malzemelerinin makro mekanik özellikleri

Örnek No	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	E (GPa)
1	20.58	3.41	15
2	11.16	2.01	7.5
3	7.1	0.71	5.5



Şekil 4.3. Örneklerin tek eksenli sıkışma dayanımı ve çekme dayanımı deneylerinden elde edilen gerilim-deformasyon eğrileri

Kaya malzemelerine ait makro-mekanik özellikler belirlenirken yoğunluk, tane çapı, porozite gibi fiziksel özelliklerin dışında her bir partiküle ait olan efektif modül, rijitlik, sürtünme katsayısı, çekme dayanımı ve kohezyon gibi en uygun mikro mekanik özellikler veya değerler seçilmiş ve bunun için çok sayıda iterasyon yapılmıştır. Genel bir kabul olarak bir kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı ve çekme dayanımı arasındaki oranın 10-20 arasında olması beklenir. Sheorey (1997)'in yapmış olduğu çalışmalardan elde ettiği bu oran, ileri yıllarda birçok araştırmanın konusu olmuş ve Cai ve Kaiser (2006) bu oranın çok yüksek olduğunu belirtmiş ve kaya davranışlarının buldukları sahaya veya lokasyona, gerilim koşullarına bağlı olarak değişiklik göstereceğini vurgulamıştır. Yukarıda belirlenen kaya malzemesi dayanım özellikleri ele alındığında her bir örneğin sırasıyla (örnek 1, 2, 3) tek eksenli sıkışma dayanımı ve çekme dayanımı arasındaki oranın 6.03, 5.55 ve 10 olduğu görülmektedir.

Tüm kaya modelleri, düşey gerilme pik gerilmenin % 70'ine eşit oluncaya kadar yüklenmiş ve çekme gerilmeleri negatif, sıkışma gerilmeleri ise pozitif değer olarak kabul edilmiştir. Yapılan iterasyonlar sonucunda, malzemelerinin tek eksenli sıkışma dayanımının efektif modülün (emod) artmasıyla azaldığı, rijitlik oranının (krat), bağ kohezyonun (pb_coh) ve bağ çekme dayanımının (pb_ten) artmasıyla arttığı belirlenmiştir. Kaya malzemesi çekme dayanımı, partiküller arasındaki lineer kısmın efektif modülü (emod_{lineer}) ve paralel bağın çekme dayanımı (pb_ten) ile doğru orantılıdır. Kaya malzemelerinin elastisite modülünün ise doğrudan efektif modülü, bağ çekme dayanımı (pb_ten) ve rijitlik oranı ile ilişkili olduğu görülmüştür.

4.2. Süreksizliklerin Oluşturulması

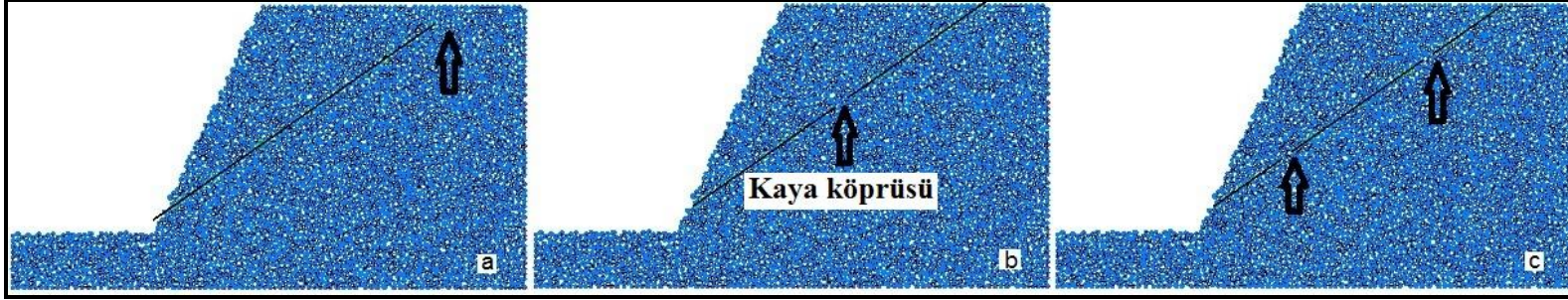
Kaya şevlerini kesen eklemlerin özellikleri Ivars ve ark. (2008) tarafından önerilen smooth-joint (pürüzsüz eklem) yöntemine göre belirlenmiştir. Bu yöntemde partiküller arasına atanan düz bir yüzey, partiküllerin birbiri üzerine bindirerek hareket etmesine olanak sağlamaktadır. Bu şekilde partiküllerin birbirinin çevresinden dolanarak hareket etmesi, dolayısıyla oluşacak ekstra pürüzlülük durumu önlenmiş olmaktadır. Smooth-joint yöntemine göre belirlenen eklemlere ait mikro parametreler Çizelge 4.3 'te verilmiştir. Normal ve makaslama rijitliği, sürtünme katsayısı ve kohezyondan oluşan bu özellikler, her bir eklem için ayrı ayrı belirlenebilmektedir. Smooth-joint yöntemi Mohr-Coulomb teorisine göre uygulanmaktadır.

Çizelge 4.3. Smooth-joint yöntemine göre belirlenen eklemlerin mikro parametreleri

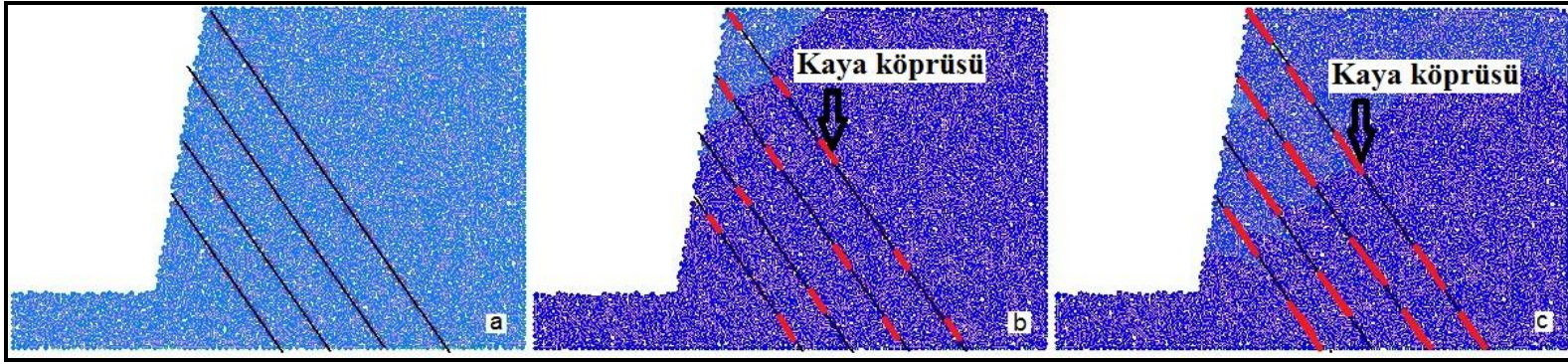
Parametre	
Normal rijitlik, sj_kn (GPa)	10
Makaslama Rijitliği, sj_ks (GPa)	10
Sürtünme, sj_fric (tan ϕ)	0.36
Kohezyon, sj_coh (MPa)	0
Çekme dayanımı, sj_ten (MPa)	0

Yapılan analizlerde eklemlerin kohezyon değeri sıfır olarak alınmıştır. Çünkü gravite arttırma yöntemine göre belirlenen stabilite durumunun, limit denge analizleriyle uyumlu olduğu koşullar yalnızca kohezyonsuz ortamlar için geçerli olmuştur. Aksi halde kaymaya karşı koyucu kuvvetler ile kaydırıcı kuvvetler, denge halindeyken birbirine eşit çıkmamaktadır. F ; güvenlik katsayısı, c ; kohezyon W ; kayan kütlelerin ağırlığı, A ; alan, α ; şev eğim açısı ve ϕ ; içsel sürtünme açısı olmak üzere $(W \sin \alpha)$ kaydırıcı kuvvetler ve $(cA + (W \cos \alpha) \tan \phi)$ ise kaymaya karşı koyucu kuvvetler olarak ifade edilir. $F=1$ iken, $(cA + (W \cos \alpha) \tan \phi) = (W \sin \alpha)$ olmalıdır. Gravite arttırma yönteminde gravite oranı $F = g_i/g_o$ olmak üzere, g_i yenilme anındaki gravite değeri ve g_o ilksel gravite değeri olup kaymaya karşı koyucu kuvvetler, kaydırıcı kuvvetlere eşitken yenilme anındaki gravite değeri de 9.81 m/s^2 olacaktır. İşte bu ilişki yalnızca $c=0$ koşuluyla karşılanmaktadır. Bu sebeple şev modellerine atanan eklemler kohezyonsuz olarak ele alınmış ve dolayısıyla dolgu malzemesi de kullanılamamıştır.

Bir düzlem/doğrultu boyunca sıralanan eklemler arasında kalan sağlam kaya malzemesi kaya köprüsü (rock bridge) olarak adlandırılmaktadır. Bu tanımdan da yola çıkarak hem düzlemsel kayma mekanizması, hem de devrilme türü yenilme mekanizması için farklı eklem uzunlukları (veya kaya köprüsü aralıkları: 1 m, 0.6 m ve 0.4 m) belirlenmiştir (Şekil 4.4 ve 4.5). Bu şekilde mevcut eklemlerin ilerleyişi veya kaya köprüsü aralıklarında gelişen yeni eklemlerin oluşumu gözlenmiştir. Süreksizliklerin eğim açısı düzlemsel yenilme mekanizmasında 35° , devrilme türü yenilme mekanizmasında 55° dir.



Şekil 4.4. Düzlemsel kayma analizlerinde kaya köprüsü aralıkları sırasıyla a) 1 m b) 0.6 m ve c) 0.4 m dir



Şekil 4.5. Devrilme analizlerinde kaya köprüsü aralıkları sırasıyla a) 0 b) 0.4 m ve c) 0.6 m dir

4.3. Kaya Şevlerinin Oluşturulması

Tez çalışması kapsamında kaya şevlerinde gelişen düzlemsel, devrilme türü yenilme mekanizması, düzlemsel yenilmenin bir türü olan basamaklı şev yenilme mekanizması ve farklı yönelimlerdeki eklemlerin kombinasyonundan oluşan karmaşık yenilme mekanizmaları irdelenmiştir. Her ne kadar kama tipi kaymalar, şevlerde meydana gelen yenilme türlerinden biri olsa da bu çalışmada dikkate alınamamıştır. Çünkü kullanılan kod iki boyutlu olduğundan, kama tipi kayma için yapılan tüm modeller düzlemsel kayma mekanizmasıyla aynı özellikte olacaktır.

Kaya şevlerindeki düzlemsel yenilme mekanizması, öncelikle kaya malzemesi ve süreksizlerin dayanım ve deformasyon özelliklerine ve süreksizlikler ile şevlerin geometrik özelliklerine bağlıdır (Hoek ve Bray, 1981; Einstein ve ark., 1983). Özellikle süreksizliklerin devamlılığı düzlemsel yenilme mekanizması üzerinde doğrudan etkilidir. Bugüne kadar yapılan çalışmalar, devamlılığı az olan süreksizlik içeren şevlerin daha duraylı/güvenli olduğunu göstermiştir. Ancak kimi zaman bu tür süreksizliklerin çevresel gerilmeler veya teknik müdahalelere bağlı olarak birleşme yada devamlılıklarında ilerleme görülebilir. Dolayısıyla süreksizliklerde bu şekilde bir davranışın gelişmesi, yenilmeleri de beraberinde getirecektir. Bu konu ile ilgili olarak literatürde yapılan çalışmalar, düzlemsel yenilmeler üzerinde kaya kütlelerindeki mekanik ve fiziksel parametrelerin yanı sıra süreksizliklerin birleşme, ilerleme eğilimleri, basamaklı bir yapı sunan süreksizliklerin veya iki süreksizlik arasında kalan sağlam kaya aralıklarının (kaya köprüleri / rock bridge) özelliklerini ele almıştır. Örneğin Camones ve ark. (2013) eklemlili kaya kütlelerindeki basamaklı (step-path) şev yenilmesini ayrık elemanlar yöntemiyle incelemiştir. Araştırmacılar 57 MPa tek eksenli sıkışma dayanımına sahip kaya malzemelerinde eklemlerin ilerleyişini ve birleşme eğilimini Jennings limit denge yöntemiyle (Jennings, 1970) karşılaştırmıştır. Aynı düzlem üzerinde konumlanan süreksizliklerden oluşan 80 m yüksekliğinde ve 75° eğim açısındaki şevlerin güvenlik katsayısı değerleri tutucu sonuçlar üretirken, farklı düzlem üzerinde bulunan süreksizliklerden oluşan şevlerde güvenlik katsayısı değerleri Jennings yöntemiyle uyumlu sonuçlar vermiştir. Wong ve Wu (2014), benzer geometride şevlerde kaya köprülerinin uzunluğunun doğrudan güvenlik katsayısıyla orantılı olduğunu belirtmiştir. Bahaaddini ve ark. (2013) süreksizliklerin geometrik özelliklerinin (yönelim, uzunluk, açıklık, aralık, basamak açısı) yenilme mekanizması ve 3.4 MPa dayanıma sahip kaya malzemesi üzerindeki etkisini PFC3D yazılımıyla incelemiştir. Sonuçlar, asal gerilme eksenleriyle süreksizliğin yönelimi arasındaki açının, kaya köprüsü uzunluğu sabit kalmak koşuluyla, düzlemsel kaymadan blok tipi kaymaya geçişteki en önemli parametre olduğunu göstermiştir. Scholtes ve Donze (2015) basamaklı

yenilme mekanizmasının kaya köprülerinde oluşan çekme gerilmelerinin bir sonucu olduğunu belirtmiştir. Cao ve ark. (2014) üç eklemlili kaya örnekleri üzerinde tek eksenli sıkışma deneyleri yapmış ve süreksizliklerin yöneliminin (aynı zamanda kaya köprülerinin yönelimleri 25° veya 45°) 25° olması durumunda yenilme sırasında yanlara doğru çatlakların gelişeceğini (wing crack) ifade etmiştir. Araştırmacılar ayrıca kaya köprülerinin yönelim açılarındaki artışın eklemlerin birleşmesine neden olduğunu belirtmiştir. Prudencio ve Van Sint Jan (2007) devamlı olmayan süreksizlikler içeren yapay kaya türü malzemeler üzerinde laboratuvar deneyleri yapmış ve dayanım üzerinde anizotropi etkisini çalışmıştır. Yenilmenin σ_2/σ_c oranına bağlı olduğunu belirten araştırmacılar, süreksizliklerin dayanım ve deformasyon özelliklerinin de yenilme üzerinde önemli bir rolü olduğunu ifade etmiştir. Eğer devamlı olmayan süreksizlikler arasındaki basamaklanma açısı 90°'yi geçerse, düzlemsel yenilme mekanizması başlamaktadır. Ghazvinian ve ark. (2012), JC eklem katsayısı (eklem uzunluğu / toplam makaslama uzunluğu) olmak üzere kaya köprülerindeki eklem türlerinin çekme veya makaslama olacağını belirtmiştir. Paralel bağ yöntemine göre kurulan modeller makaslama yerine çekme gerilmesi sonucu yenilmiş, toplam eklemlerin % 45'i pik dayanım seviyesinde gelişmiştir. Geriye kalan % 55'lik kısım ise yenilme sonrasında meydana gelmiştir.

Kaya şevlerindeki yenilme şekilleri şevlerin geometrik özelliklerine de bağlıdır. Öyle ki, Hammah ve ark. (2009) sonlu elemanlar yöntemiyle yaptıkları sayısal modellerinde, şev yüksekliğinin 90 m'yi geçmesi koşulunda güvenlik katsayısı değerlerinde bir değişiklik olmadığını belirtmiştir. Araştırmacılar buldukları sonuçlara göre, düzlemsel kaymanın daha çok 20 m yüksekliğindeki şevlerde geliştiğini ve eğer şev yüksekliği 60 m'ye ulaşırsa yenilmenin radyal şekilde gerçekleşeceğini vurgulamıştır.

Kaya şevlerinde görülen diğer bir önemli yenilme mekanizması devrilme türü duraysızlıklardır. İlk kez Müller (1968), İtalya'da Vaiont Vadisinde gelişen heyelanın blok rotasyonu sonucu tetiklenmiş olabileceğinden bahsetmiştir. Müller'den sonra Goodman ve Bray (1976) bükülme, blok türü ve bükülmeli-blok türü yenilmenin bir arada görüldüğü üç tür devrilme mekanizması tanımlamıştır. Bu yenilme mekanizmaları daha sonra birçok nümerik çalışmanın da konusu olmuştur. Örneğin Jiang ve ark. (2015) 30° ve 60° eğimli iki süreksizlik setinin ve farklı şev yüzeylerinin (sert ve gevşek) yenilme mekanizması üzerindeki etkisini incelemiştir. Eklemlili kaya kütleleri üzerinde makaslama deneyleri yapmış, devamlı, aynı düzlemlili ve farklı düzlemler üzerinde bulunan süreksizlikler içeren şevlerde ilerleme ve birleşme eğilimini modellemiştir. Brideau ve Stead (2010) ise devrilme, yatay ve bazal olmak üzere 3 tür süreksizlik belirlemiş, bu süreksizliklerin eğim yönlerinde 20°'ye kadar meydana gelen değişimlerin yenilme yönünü de etkilediğini ifade

etmiştir. Zhang ve ark. (2010) 64 cm yüksekliğinde ve 620 MPa elastik modülüne sahip blokların devrilme davranışlarında içsel sürtünme açılarının etkisini araştırmıştır. Kohezyon sıfır olmak koşuluyla $\tan \alpha \leq \tan \phi$ olduğunda (α : şev eğim açısı ve ϕ : içsel sürtünme açısı) nümerik yöntemle bulunan sonuçlar, Goodman ve Bray (1976) yönteminin kaymaya karşı direnç özelliği bulunmasından dolayı daha yüksek hesapladığını göstermiştir. Aynı araştırmacılar 67.5 cm uzunluğundaki bir başka şev modellerinde, tabakalanma düzlemleri ile eklemler arasındaki açıyı 60° olacak şekilde tasarlamış ve devrilme mekanizmasında çatlak ilerleyişini modellemiştir. Yükün artmasıyla birlikte eklemler birleşme eğilimine geçerek blokları oluşturmuş ve yenilme bu blokların rotasyonu sonucu gelişmiştir. Pritchard ve Savigny (1990), 190 m yüksekliğinde ve 45° eğimli bir şevdeki devrilme türü duraysızlıkları UDEC yazılımını kullanarak modellemiştir. Scholtez ve Donze (2012), 40° ve 80° açıyla şevin içerisine doğru uzanan süreksizliklerle kesilmiş 70° eğimli şev modellerinin yenilme mekanizmalarını gravite arttırma yöntemiyle incelemiştir. Araştırmacılar eklemlerin içsel sürtünme açısı 25° olmak üzere, bükülmeli devrilme mekanizmasının 80° lik eğimli süreksizlikler içeren şevlerde görüldüğünü belirtmiştir. Alzo'ubi ve ark. (2010) devrilme mekanizması üzerinde çekme dayanımının etkisini ayırık elemanlar yöntemiyle araştırmıştır. 0.395 m yüksekliğinde ve 61° eğimli bir şevde, 80° açıyla şev içine doğru uzanan süreksizlikler 10 mm arayla sıralanmıştır. Çekme dayanımı arttıkça, yenilme anındaki gravite değeri artarken, süreksizliklerin içsel sürtünme açısının yenilme mekanizması veya yenildiği andaki gravite değeri üzerinde pek fazla etkisi olmadığını belirtmiştir.

Genel olarak, literatürdeki çalışmalarda devrilme türü duraysızlıklar üzerinde, şevin ve süreksizliklerin eğim/eğim yönleri ile süreksizliklerin mekanik özelliklerinin etkisi incelenmiştir. Düzlemsel yenilme mekanizmaları ise genellikle tek bir kaya türü ele alınarak çalışılmıştır. Özellikle devrilme türü duraysızlıklarda, süreksizlikler arasında kalan kaya köprülerinin (sağlam kaya aralıklarının) etkisi literatürde yeteri kadar araştırılmamıştır. Bu doktora tezi ile literatürdeki söz konusu boşlukların doldurulması amaçlanmıştır. Bu amaçla 8 ve 10 m yüksekliğinde, düzlemsel kayma analizleri için 55° ve 75° eğim açılarında ve devrilme analizleri için 80° eğim açısında şevler tasarlanmıştır. Şev geometrisinin, eklem/kaya köprüsü uzunluğunun ve kaya malzemesi türünün düzlemsel ve devrilme türü yenilme mekanizmalarındaki etkisi aşağıdaki bölümlerde tartışılacaktır.

Kaya malzemesinden süreksizlikler içeren şevlerin oluşturulmasına kadar geçen modelleme süreci ise şu şekilde sıralanmaktadır (Şekil 4.6):

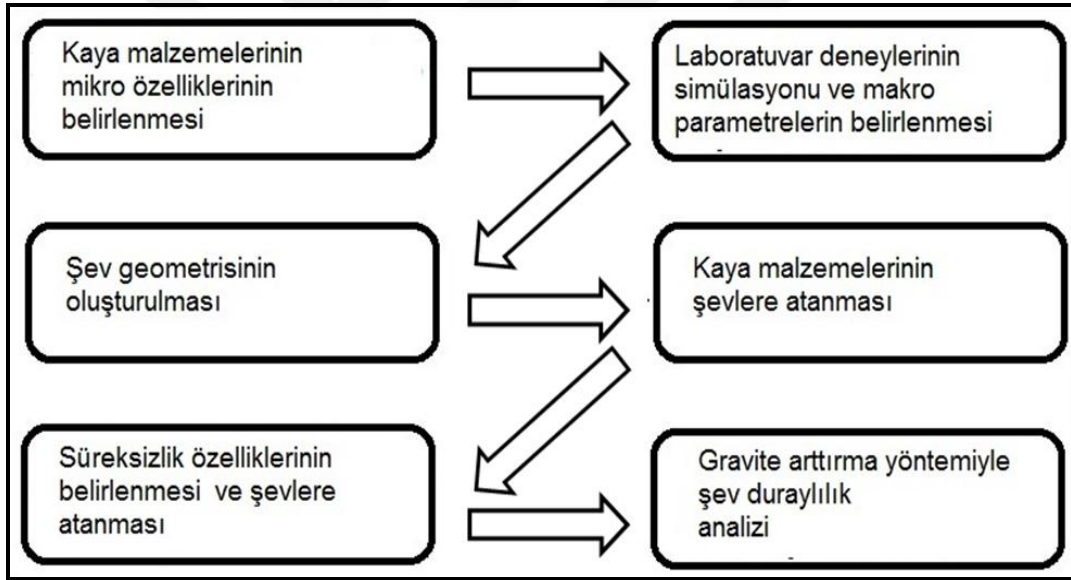
i. 4 m yüksekliğinde, 2 m genişliğindeki (ve 1 m derinliğe sahip olduğu kabul edilen) dikdörtgen prizma boyutlarında 0.08 ve 0.12 m çaplara sahip dairesel partiküller en uygun porozite değerinde rastgele dağıtılmıştır.

ii. Örnekler bir dizi tek eksenli sıkışma dayanımı, çekme dayanımı deneyine tabi tutularak, taneleri birbirine bağlayan bir çimento görevi yapan paralel bağ metodunun en uygun mikro parametreleri (emod, krat, pb_ten, pb_coh vb.) belirlenmiştir. Laboratuvar deneylerinin simülasyonundan elde edilen gerilim-deformasyon grafiklerinden kaya malzelerinin makro-mekanik özellikleri (σ_c , σ_t ve E) tayin edilmiştir.

iii. Şev geometrisi oluşturulduktan sonra istenilen makro özellikleri karşılayan kaya malzemelerinin mikro parametreleri şevlere atanmıştır.

iv. Süreksizlik özellikleri belirlenmiş ve istenilen konumlarda yerleştirilmiştir.

v. Oluşturulan kaya şevinin gravite arttırma yöntemine göre stabilitesinin bozulduğu andaki davranış analiz edilmiştir.

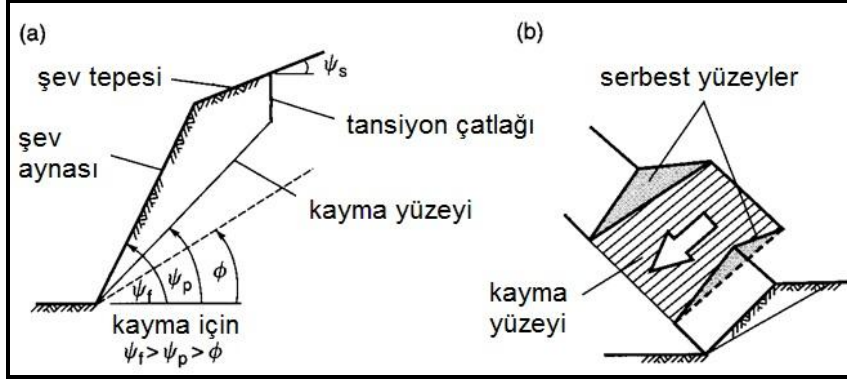


Şekil 4.6. Kaya şevi duraylılık analizlerinde izlenecek adımların şematik gösterimi

4.3.1. Düzlemsel Yenilme Mekanizması

Bir kaya kütlelerinde düzlemsel yenilme mekanizmasının gelişmesi için başlıca iki temel koşul gereklidir (Hoek ve Bray, 1981). Bunlardan ilki, süreksizlik doğrultusunun şevin doğrultusuna paralel veya paralele yakın olması (yaklaşık $\pm 20^\circ$), diğeri ise süreksizliğin eğim açısının, şevin eğim açısından küçük fakat içsel sürtünme açısından büyük olması koşuludur (α şev eğim açısı, Ψ süreksizliğin eğim açısı, ϕ içsel sürtünme açısı olmak üzere $\alpha > \Psi > \phi$ şeklinde bir ilişki şarttır) (Şekil 4.7). Bu koşullar dikkate alınarak, yukarıda belirlenen kaya malzemesi özellikleri öncelikle 8 m ve daha sonra 10 m

yüksekliğindeki şevlere atanmıştır. Her iki yükseklik için 55° ve 75° 'lik eğim açısıyla şev yüzeyi tasarlanmıştır. Şevlerde yeraltı suyu bulunmamakta ve süreksizlik yüzeylerinde bozunma veya pürüzlülük dikkate alınmamaktadır.



Şekil 4.7. Düzlemsel kayma mekanizması şematik görünümü

i. Şev yüksekliği, $h = 8$ m

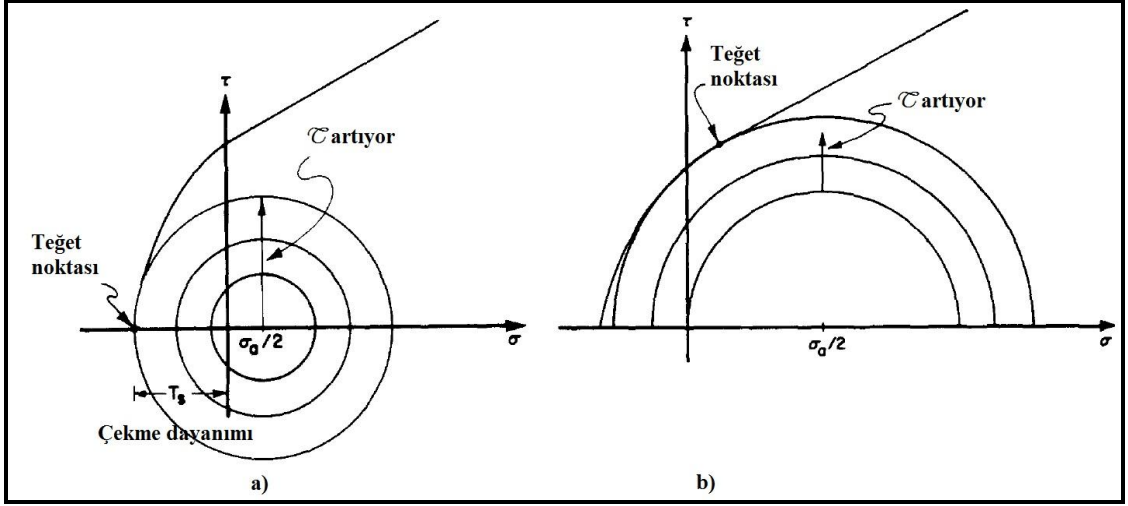
55° ve 75° eğime sahip kaya şevleri sırasıyla 1, 0.6 ve 0.4 m kaya köprüsü (d) aralıkları içeren eklemelerle kesilmektedir ve yerçekimi ivmesi $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ iken tüm modeller stabil durumdadır. Şevlerdeki bu stabilite durumu, gravite arttırma yöntemiyle bozulmakta ve malzemenin yenilmeye başladığı andaki yerçekimi ivmesi belirlenmektedir. Simülasyonlarda kullanılan örnekler dayanım ve deformasyon özellikleri bakımından ele alındığında, yenilme anındaki gravite değerleri arasında $g_{\text{örnek 1}} > g_{\text{örnek 2}} > g_{\text{örnek 3}}$ şeklinde bir ilişki vardır. Tüm şev modellerindeki yenilmeler öncelikle kaya köprüsü zonunda meydana gelen bir çekme çatlaklarının şev aynasıyla veya şev tepesiyle birleşmesi sonucunda başlamaktadır. Bu durum kaya köprüsü zonunda gelişen çekme gerilmelerinin söz konusu kaya malzemesinin çekme dayanımını aşmasıyla oluşmaktadır. Einstein ve ark. (1983) kaya şev stabilitesinde süreksizlik devamlılığının etkisini araştırdıkları çalışmalarında, düşük normal gerilim koşullarında (σ_a) genellikle makaslama yenilmesinin olmadığını belirtmiştir (Şekil 4.8). Ayrıca araştırmacılar eklem devamlılığındaki küçük değişimlerin büyük dirençler doğuracağını da ifade etmiştir. Bu bakımdan elde edilen model sonuçları, Einstein ve ark. (1983)'nin sonuçlarıyla son derece uyumlu çıkmıştır. Öyle ki, her üç örnek de kaya köprüsü aralığının (d) azalmasıyla daha yüksek gravite değerlerinde yenilmeye başlamaktadır. Kaya köprüsünün konumu ise malzemenin yenilmeye başladığı yeri belirlemiştir.

Şev eğiminin 55° 'den 75° 'ye çıkması yenilen malzeme miktarını artırmıştır. Özellikle 1 ve 2 nolu örnekler 75° eğimli şev modellerinde daha sıkı kenetlenmiş (blok şekilli) bir

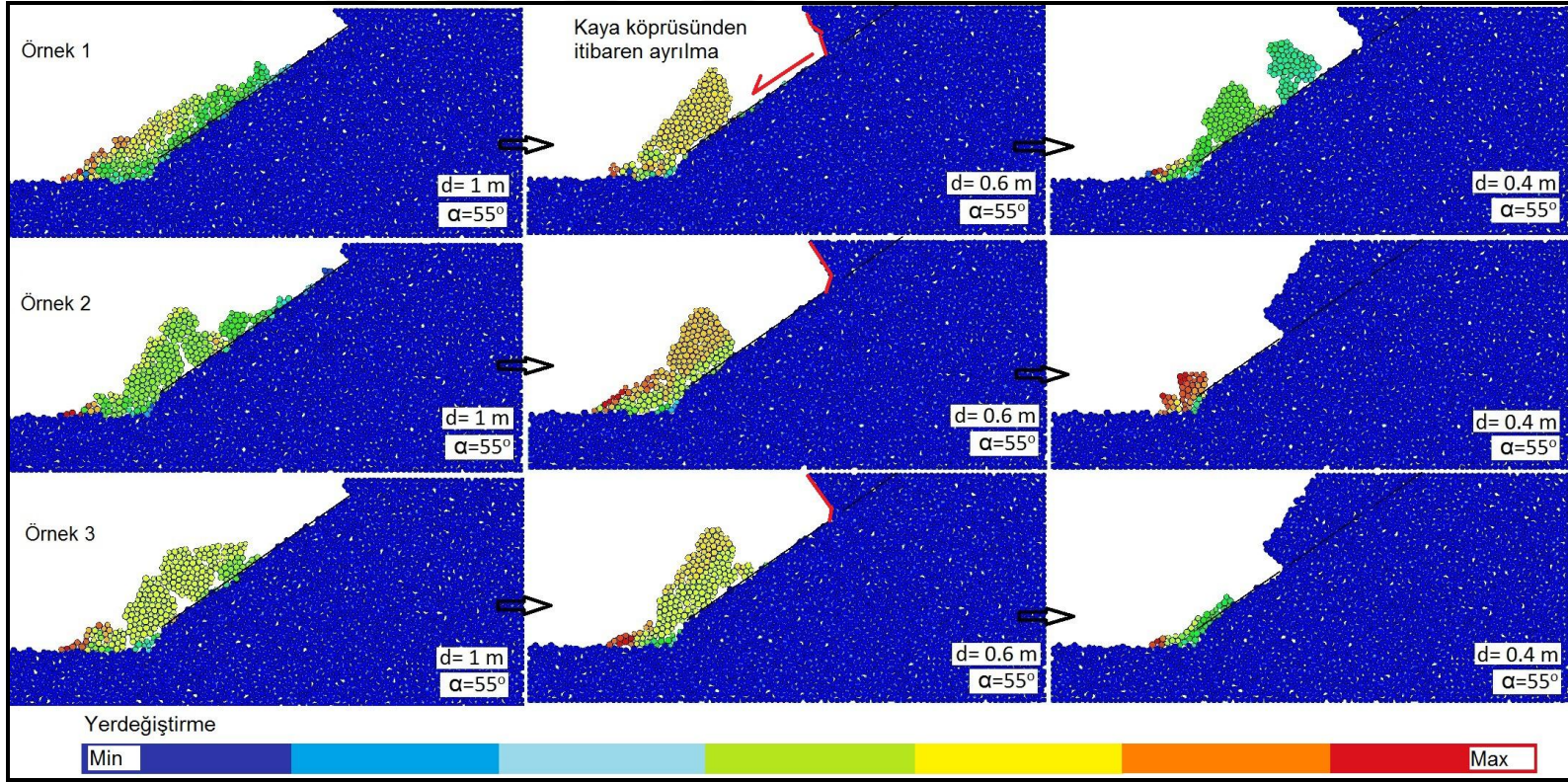
kayma şekli gösterirken, 55° eğimli modellerde ise parçalanmış veya dağılan bir davranış sergilemiştir (Şekil 4.9 ve Şekil 4.10).

ii. Şev yüksekliği, $h = 10$ m

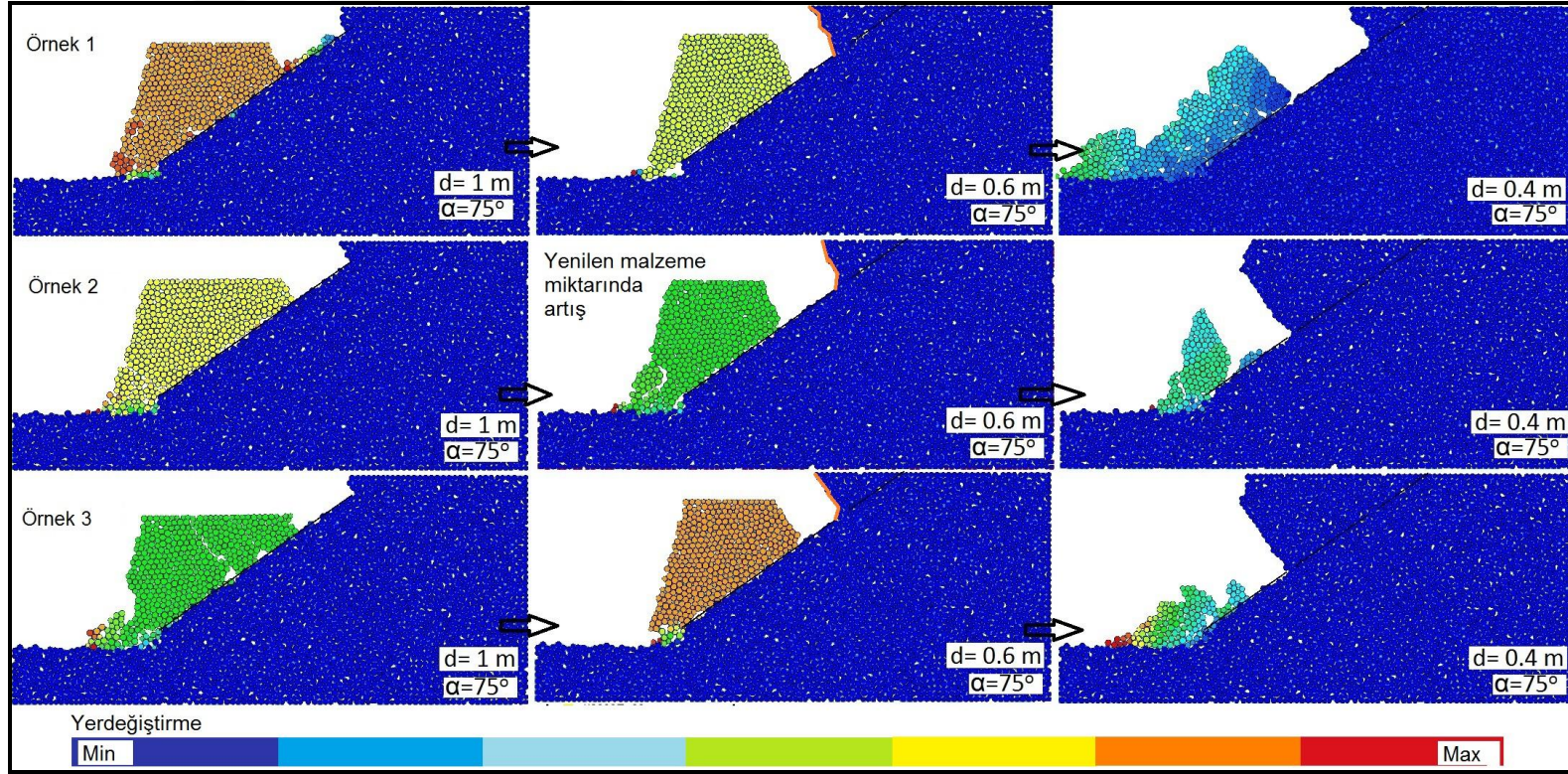
Yenilmeler bir önceki vakada olduğu gibi ilk olarak kaya köprüsü zonunda meydana gelen bir çekme çatlağının şev aynasıyla veya şev tepesiyle birleşmesi sonucunda (çekme gerilmelerinin söz konusu kaya malzemesinin çekme dayanımını aşmasıyla) başlamaktadır. Şev yüksekliğinin 2 m artması, yenilen malzeme miktarının da artmasını beraberinde getirmiştir. 8 m'lik şev modelleri ile karşılaştırıldığında 10 m'lik şevlerde, şev eğim açısı 55° ve $d = 1$ m iken tüm kaya malzemelerinin yenilme sonrası davranışlarında daha az parçalanma görülmektedir (Şekil 4.11). Bunun aksine şev eğim açısı 75°'ye çıktığında ve $d = 6$ m iken bir önceki vakadan daha hızlı ve daha çok dağılma meydana gelmiştir (Şekil 4.12). Tüm düzlemsel kayma modellerinde kaya köprüsü zonunun üzerinde bulunan malzemenin duraylılığını koruduğu görülmektedir. Bu durum kaya köprüsü zonundaki kaya malzemesinin makaslama dayanımından kaynaklanmaktadır. Gravite arttırma yöntemiyle kaya kütlelerinin kaymaya başladığı g_0 seviyesinde, en zayıf dayanım parametresi (makaslama veya çekme dayanımı) devreye girer. Bu aşamada malzemelerin çekme dayanımının, makaslama dayanımından daha düşük olması, çekme yenilmesini meydana getirmiştir. En fazla gerilim süreksizliklerin uç kısımlarında birikmektedir. Dolayısıyla yanlara doğru açılan çekme çatlakları bu uç kısımlardan itibaren gelişmektedir. Örneklerin yenilmeye başladığı andaki gravite değerleri, kaya köprüsü aralığı (d) ve kaya dayanımı ile ters orantılıdır (Şekil 4.13). Ancak burada belirtilmesi gereken önemli bir nokta, gravite arttırma yönteminin prensibine dayanan dayanım parametrelerinin sabit tutulduğu $F = g_0/g_i$ ilişkisinin şevlerdeki stabilite durumunun bozulmasına yarayan bir gravite oranı olduğu unutulmamalı ve doğadaki kaya stabilite koşulunu tanımlayan güvenlik katsayısı (F) ile karıştırılmamalıdır (Çizelge 4.4). Sternik (2013) de gravite arttırma yöntemiyle elde edilen sonuçların gerek Bishop's yöntemi (limit denge analizi), gerekse makaslama dayanım azaltma yöntemine göre oldukça yüksek sonuçlar ürettiğini belirtmiştir. Bu durum F ve F değerinin birbirinden farklı kavramlar olmasından kaynaklanmaktadır.



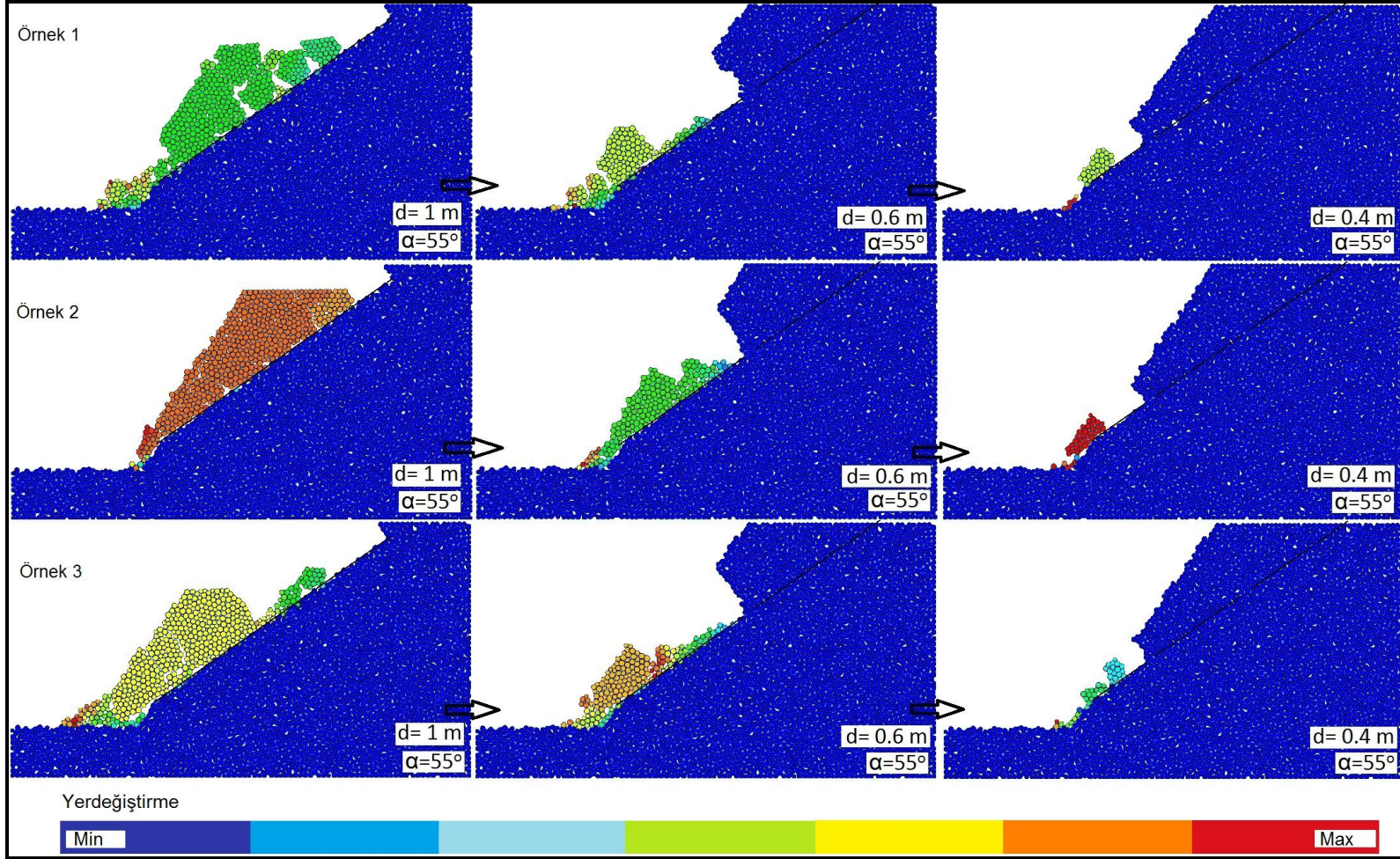
Şekil 4.8. a) Düşük normal gerilme seviyesinde çekme yenilmesini b) yüksek normal gerilme seviyesinde makaslama yenilmesini gösteren Mohr dairesi (Einstein ve ark., 1983)



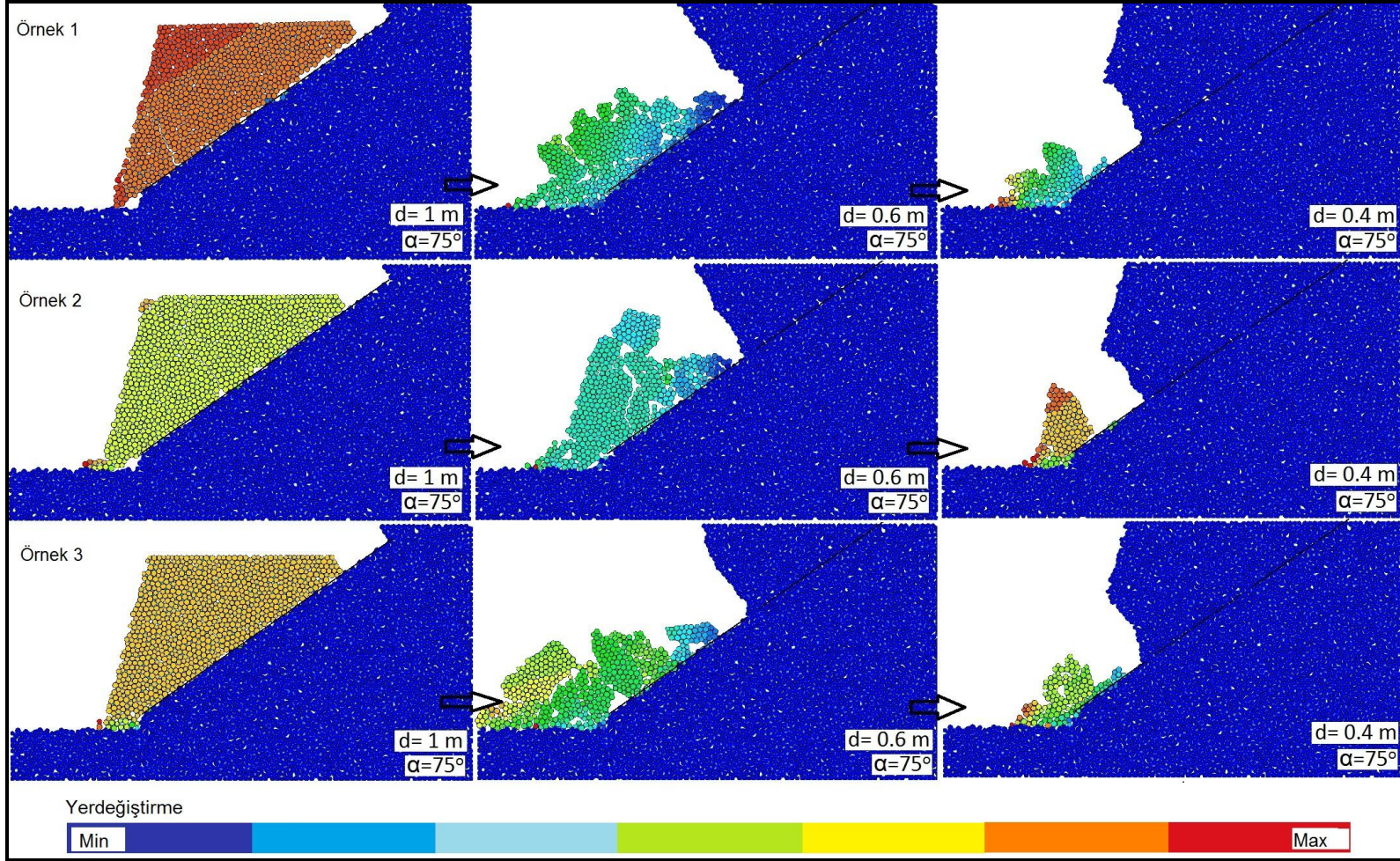
Şekil 4.9. Şev yüksekliği 8 m ve şev eğim açısı 55° iken kaya köprüsü aralıklarına bağlı olarak gelişen yenilme mekanizması



Şekil 4.10. Şev yüksekliği 8 m ve şev eğim açısı 75° iken kaya köprüsü aralıklarına bağlı olarak gelişen yenilme mekanizması



Şekil 4.11. Şev yüksekliği 10 m ve şev eğim açısı 55° iken kaya köprüsü aralıklarına bağlı olarak gelişen yenilme mekanizması

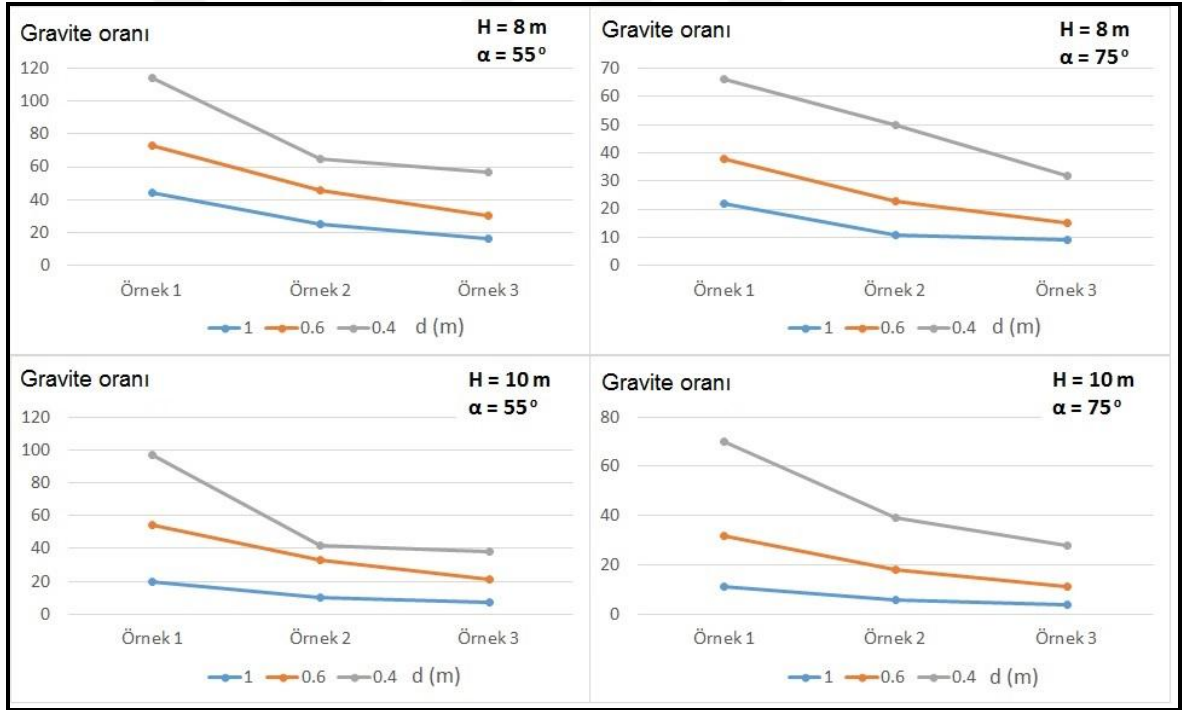


Şekil 4.12. Şev yüksekliği 10 m ve şev eğim açısı 75° iken kaya köprüsü aralıklarına bağlı olarak gelişen yenilme mekanizması

Yerçekimi ivmesinin zamana bağlı olarak artmasıyla, şevlere uygulanan gerilmeler artmakta ve artan bu gerilmenin kaymaya sebep olduğu değerin, ilksel graviteye olan oranı gravite oranını (F) vermektedir. Bu basitleştirilmiş yaklaşım her ne kadar şevdeki duraylılık durumu hakkında bilgi verse de, mukavemet parametrelerinin sabit tutularak yalnızca yük artışından bir yoruma gidilmesi yanıltıcı olabilir.

Çizelge 4.4. Gravite arttırma yöntemine göre elde edilen gravite oranları (F)

		$\alpha = 55^\circ$			$\alpha = 75^\circ$		
H (m)	d (m)	Örnek 1	Örnek 2	Örnek 3	Örnek 1	Örnek 2	Örnek 3
8m	1	44	25	16	22	11	9
	0.6	29	21	14	16	12	6
	0.4	41	19	27	28	27	17
10 m	1	20	10	7	11	6	4
	0.6	34	23	14	21	12	7
	0.4	43	9	17	38	21	17



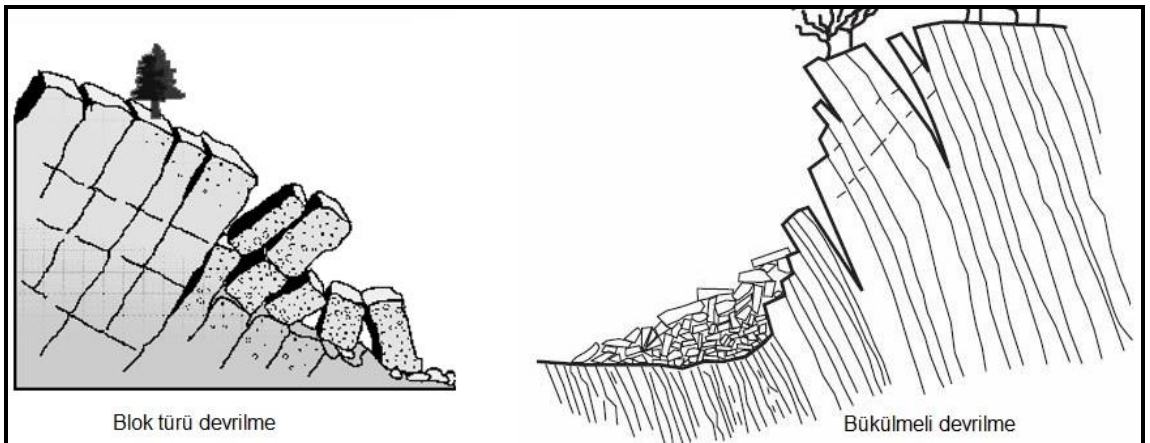
Şekil 4.13. Kaya türü ve kaya köprüsü aralıkları ile F arasındaki ilişki

4.3.2. Devrilme Türü Yenilme Mekanizması

1968 yılında ilk kez Müller tarafından bahsedilen devrilme türü duraysızlıklar, Goodman ve Bray (1976)'in bükülme tipi, blok tipi, bükülmeli-blok tipi devrilme olarak yaptığı tanımlamalarla ayrı ayrı araştırma konuları olarak literatürde çalışılmıştır. Blok türü devrilmeler, şevin içine doğru yönelmiş süreksizlik setlerinin kolon şekilli bloklar

oluşturup bu bloklardaki rotasyonel hareketin itme kuvveti oluşturmasıyla meydana gelen devrilmedir. Bükülme türü devrilmeler ise şev içine doğru eğimli olan paralel süreksizliklerin konsol kirişler gibi davranmasıyla gelişir. Bu kirişler tavandan tabana doğru kuvvetleri aktarırken bükülebilir, kıvrılabilir. İşte bu şekilde bükülme gerilmelerinin kayanın çekme dayanımını aşması durumunda, kaya kütlelerinde bükülme devrilmesi meydana gelmektedir (Şekil 4.14). Her iki yenilme türü, aynı şevde birbirinin bir kombinasyonu şeklinde de görülebilir (bloklu-bükülme veya bükülmeli-blok). Yapılan çalışmalar bir kaya şevinde devrilme türü duraysızlığın gelişebilmesi için öncelikle süreksizliğin eğim yönünün şevin eğim yönünden $180 \pm 30^\circ$ sınırları içerisinde olması gerektiğini göstermiştir. Ayrıca Ψ_p süreksizliğin eğim açısı, Ψ_f şevin eğim açısı ve ϕ içsel sürtünme açısı olmak üzere, eğim açıları ile içsel sürtünme değeri arasında $(90 - \Psi_p) \leq (\Psi_f - \phi)$ şeklinde bir ilişki olmalıdır (Goodman ve Bray, 1976). Bu nedenle, yapılan tüm çalışmalar, öncelikle bu iki koşulu dikkate alarak başlamıştır.

Bu tezde, kaya şevlerindeki devrilme türü yenilme mekanizmaları bir önceki bölümde anlatılan düzlemsel yenilme mekanizmalarında olduğu gibi şev yüksekliğine göre ($h = 8$ m ve $h = 10$ m) iki ayrı başlık altında ele alınmıştır. Şev eğim açısı 80° ve eklemlerin eğim açısı şevin içine doğru 55° 'dir. Çizelge 4.1'de verilen kaya malzemesi özellikleri bu bölümdeki şev yenilme analizleri için de kullanılmıştır. Şevlerdeki stabilite durumu düzlemsel yenilme mekanizmasında olduğu gibi gravite arttırma yöntemiyle bozulmuştur. Şev eğim açısı her iki yükseklik için 80° olarak alınmıştır.



Şekil 4.14. Devrilme türü yenilme mekanizması (Hoek ve Bray, 1977)

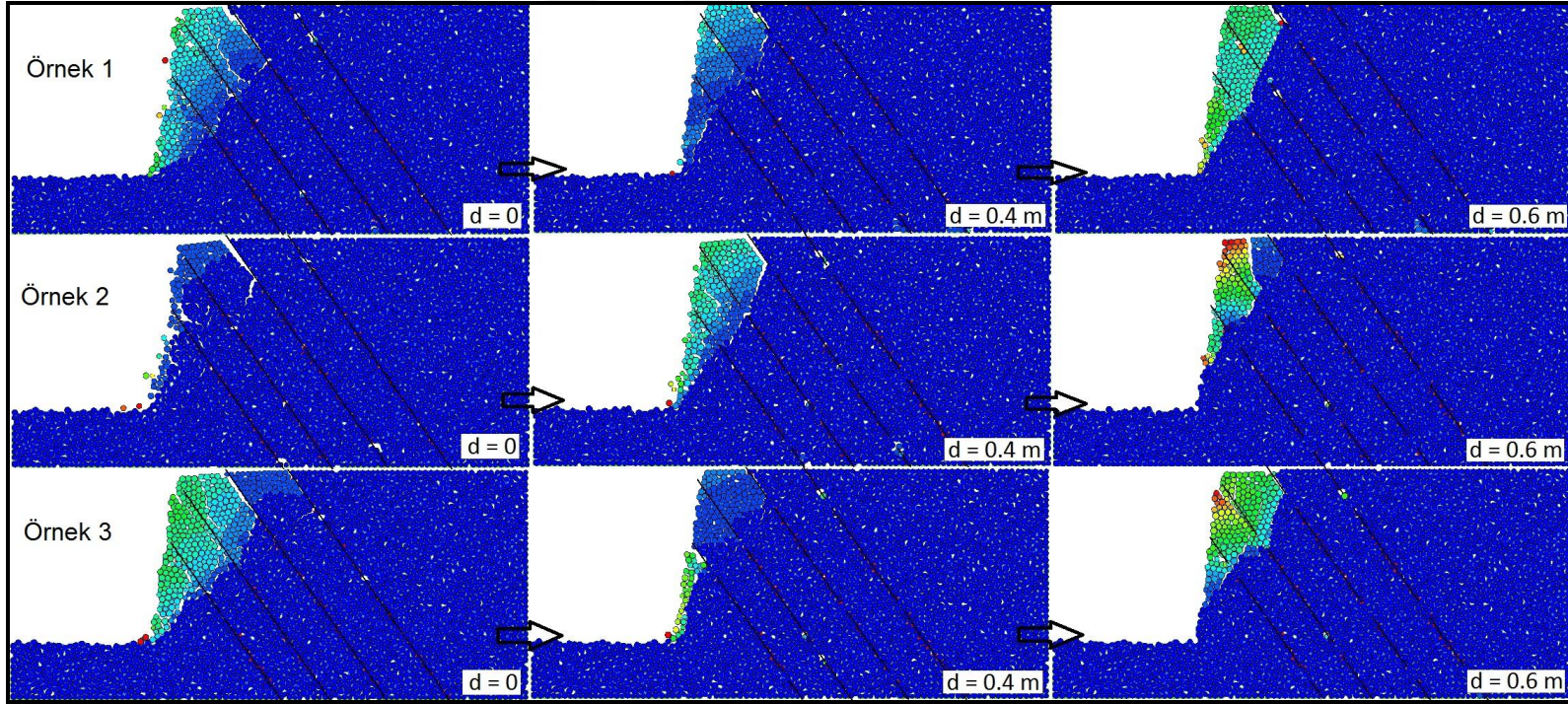
i. Şev yüksekliği, $h = 8$ m

Yüksekliği 8 m olarak tasarlanan şev modelleri ilk olarak sürekli, daha sonra 0.4 m aralıklı ve 0.6 m aralıklı eklemlerle kesilmektedir. Şekil 4.15, 4.16 ve 4.17 sırasıyla şev

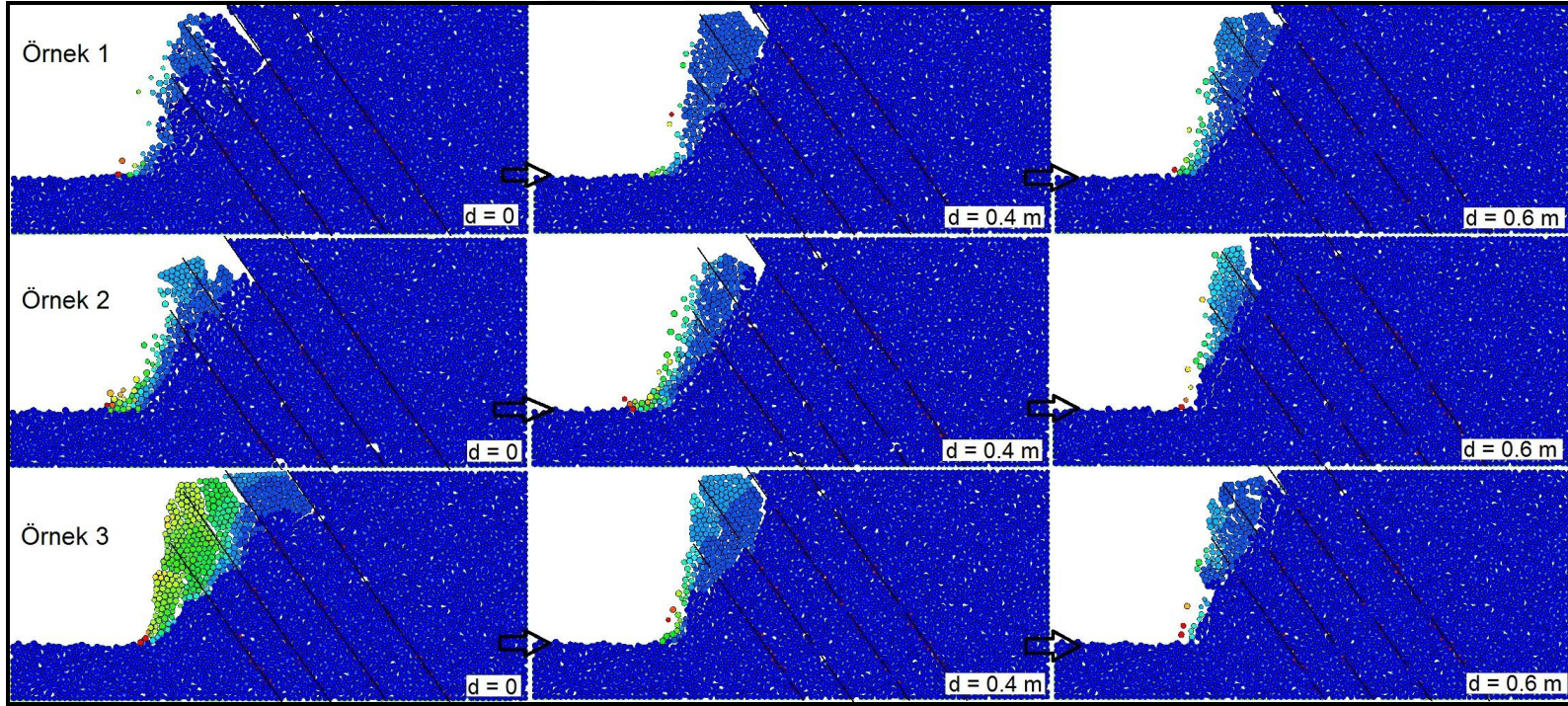
modellerinin yenilmenin başlangıcını, gelişimini ve sonlanma evresini göstermektedir. Tüm modellerde yenilme öncelikle ana eklem yöneline dik yönde gelişen çatlakların (wing crack) oluşmasıyla başlamaktadır. Bu çatlaklardan itibaren bükülerek devrilen, bir başka deyişle bir kiriş gibi davranan bloklar zamanla dağılmakta ve çatlakların (wing crack) birleşmesiyle oluşan bir düzlem boyunca malzeme geriye doğru yatarak aşağı doğru kaymaktadır. Örnekler eklemler arasında 0.4 m ve 0.6 m'lik kaya köprüleri içerdiğinde kayma yüzeyinin dairesel bir şekil aldığı görülmektedir.

ii. Şev yüksekliği, $h = 10$ m

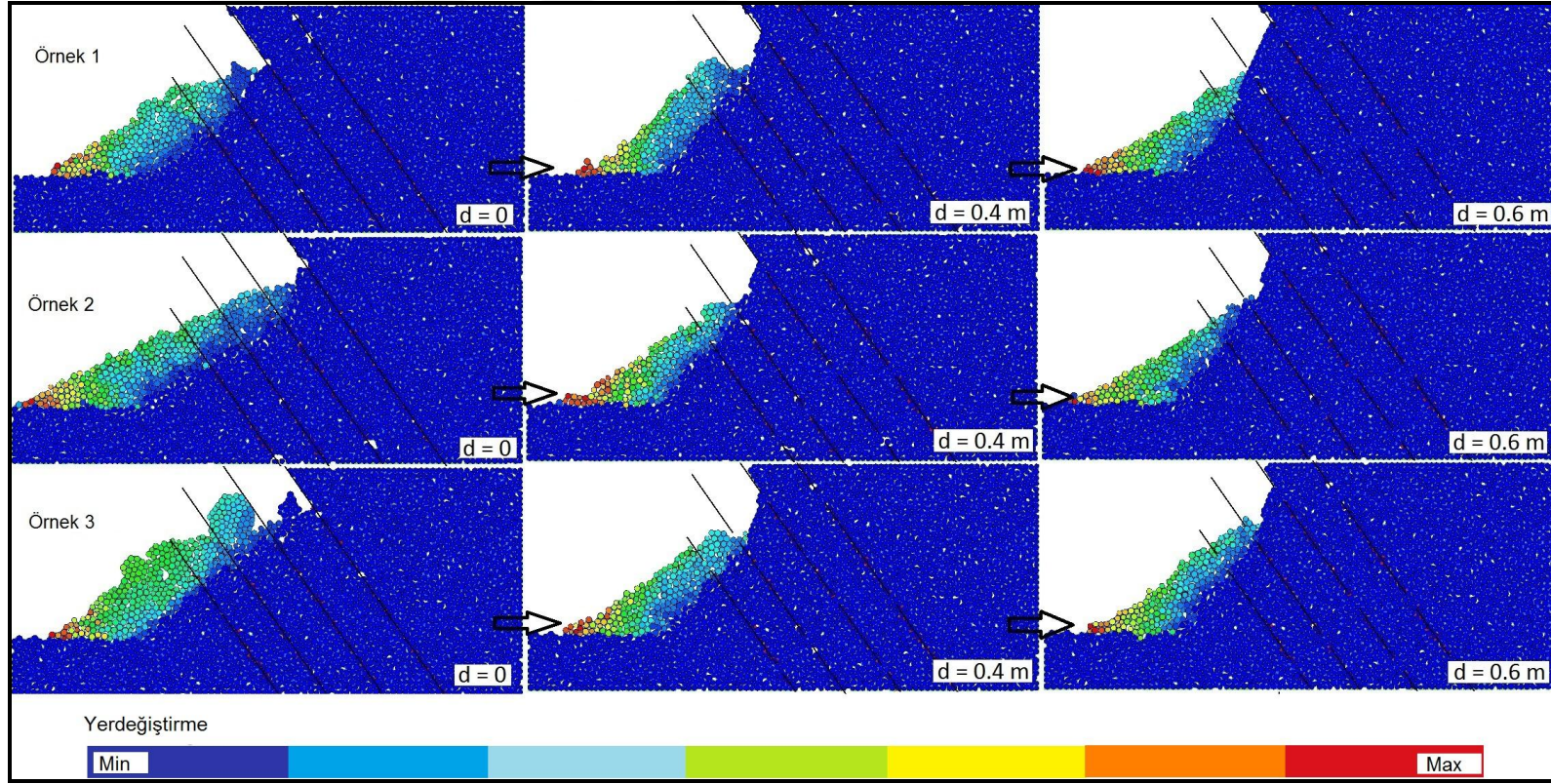
Yüksekliğin 10 m'ye çıkmasıyla yenilen malzeme miktarı doğrudan artmıştır. Önceki bölümde olduğu gibi, bu kısımdaki modeller de ikincil çatlakların oluşumuyla, belirginleşen kolonların bir kiriş gibi davranarak bükülmesiyle meydana gelmiştir (Şekil 4.19, 4.20, 4.21). Tavandan tabana doğru aktarılan kuvvetler bükülme gerilmeleri oluşturmakta ve bu gerilmelerin kayanın çekme dayanımını aşmasıyla devrilme türü yenilme oluşmaktadır. Eklemler 0.4 ve 0.6 m aralıklı kaya köprüleriyle kesildiğinde, bu kez yenilmenin başlangıç evresini kaya köprüsünün konumu da etkilemektedir. Başlangıçta şev tepesindeki ilk eklemün uç noktasından itibaren gelişen (ana süreksizlik yönüne dik yönde) ikincil eklemler daha sonra giderek derinleşen kısmen dairesel bir kayma yüzeyi oluşturmaktadır.



Şekil 4.15. Şev yüksekliği 8 m iken kaya köprüsü aralıklarına bağlı olarak yenilmenin başlaması



Şekil 4.16. Şev yüksekliği 8 m iken kaya köprüsü aralıklarına bağlı olarak yenilmenin gelişme evresi

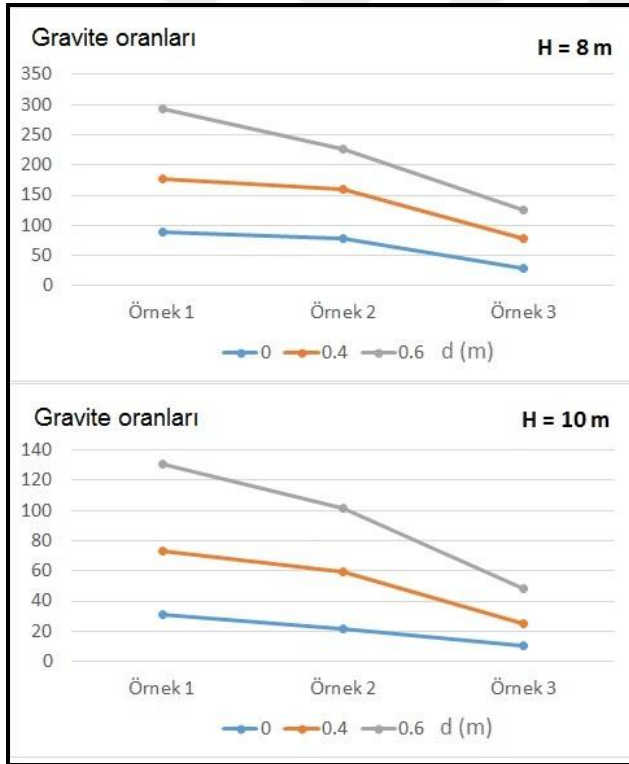


Şekil 4.17. Şev yüksekliği 8 m iken kaya köprüsü aralıklarına bağlı olarak yenilmenin sonlanmış hali

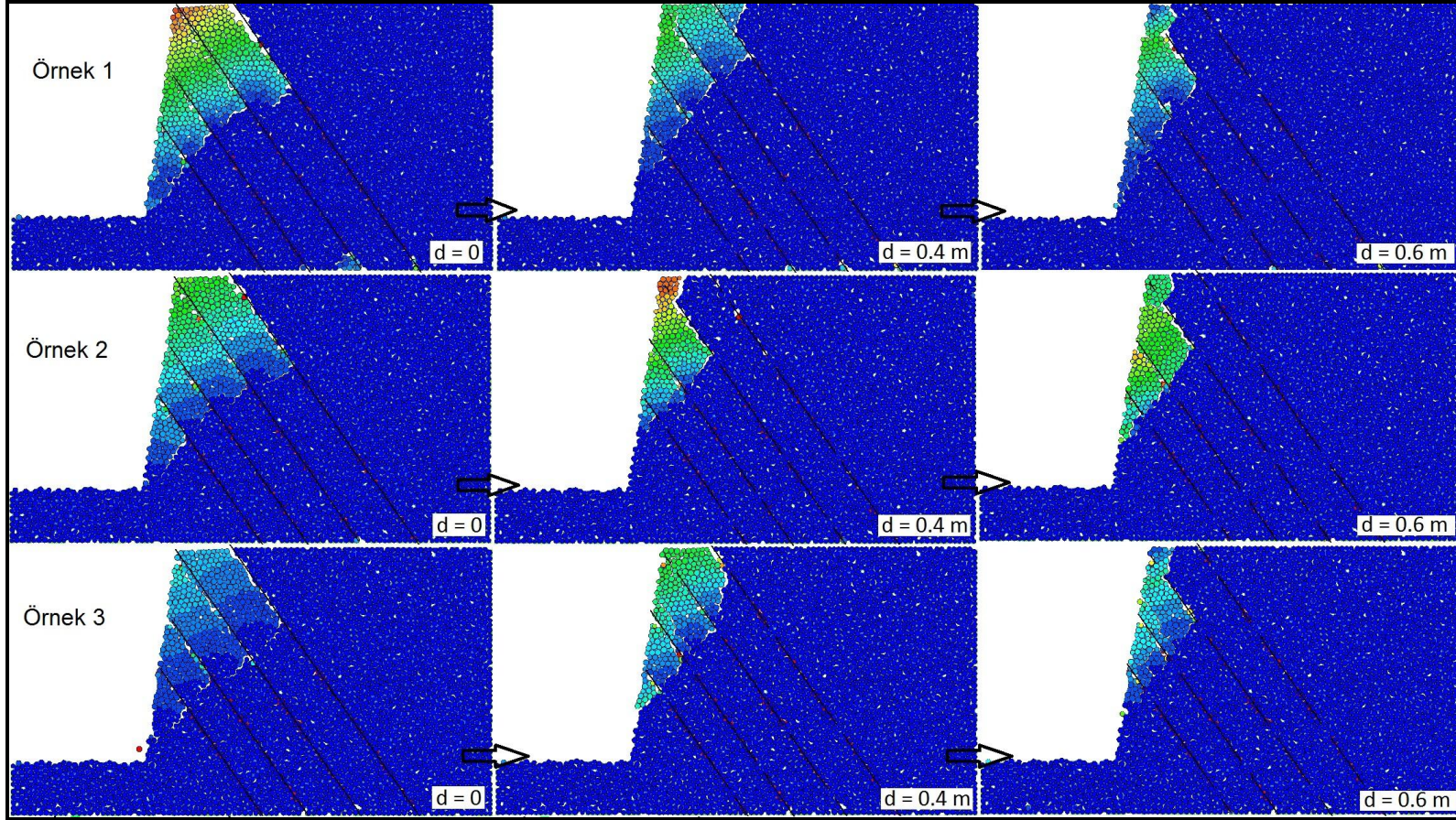
Gravite arttırma yöntemine göre elde edilen gravite oranları, kaya köprüsü aralıklarındaki artışla artan bir ilişki göstermektedir (Şekil 4.18). Ancak, bir önceki bölümde de belirtildiği gibi elde edilen gravite oranları yalnızca mevcut stabilite durumu için bir öngörüde bulunmaya olanak sağlamaktadır. Kaya malzemesine ait dayanım ve deformasyon değerleri arttıkça, o malzemenin kaymaya veya yenilmeye başladığı andaki gravite değeri de artış göstermektedir (Çizelge 4.5)

Çizelge 4.5. Gravite arttırma yöntemine göre belirlenen gravite oranları (F)

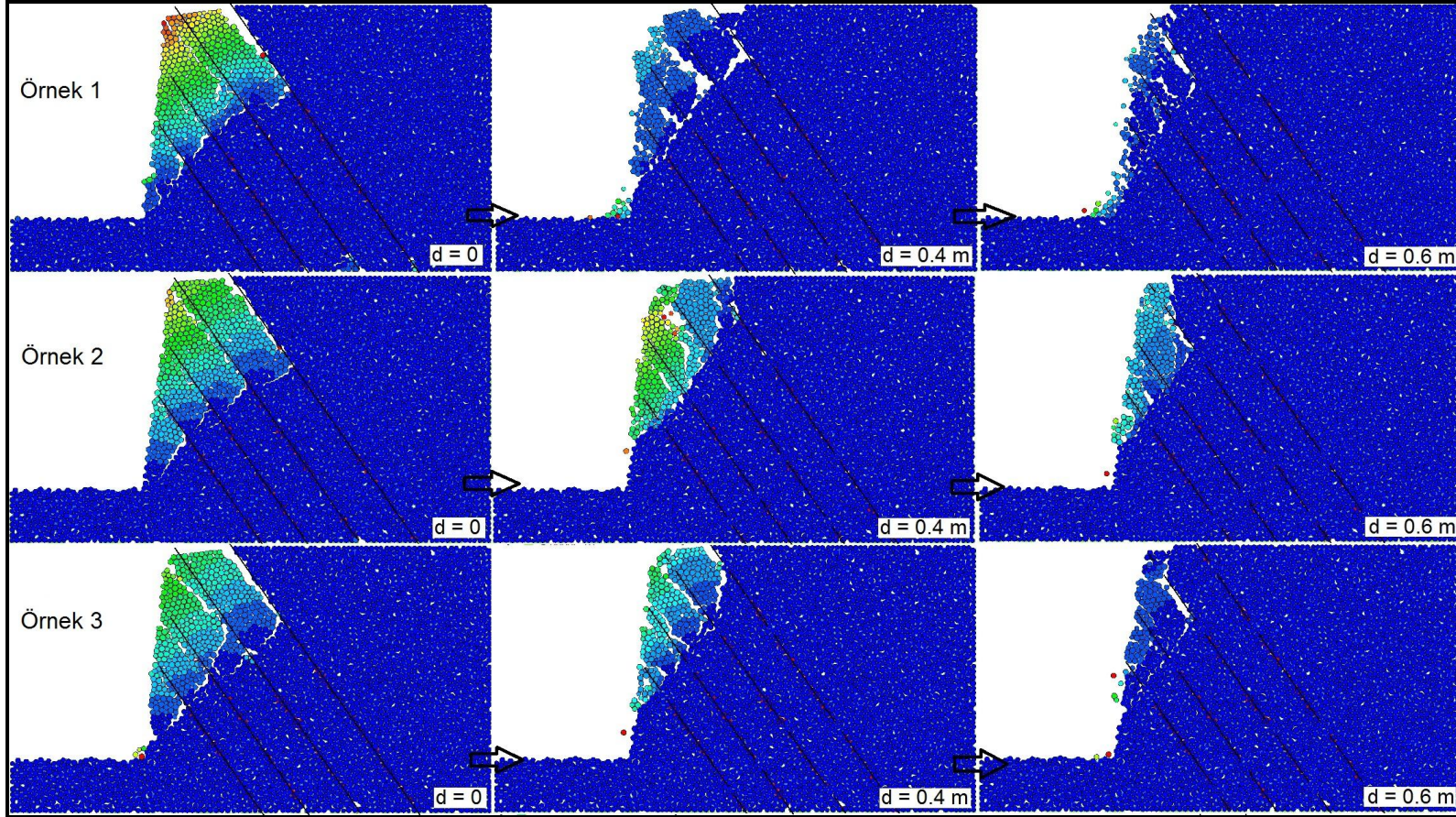
H (m)	d (m)	Örnek 1	Örnek 2	Örnek 3
8	0	89	79	29
	0.4	87	81	49
	0.6	117	66	48
10	0	31	22	10
	0.4	42	37	15
	0.6	58	42	23



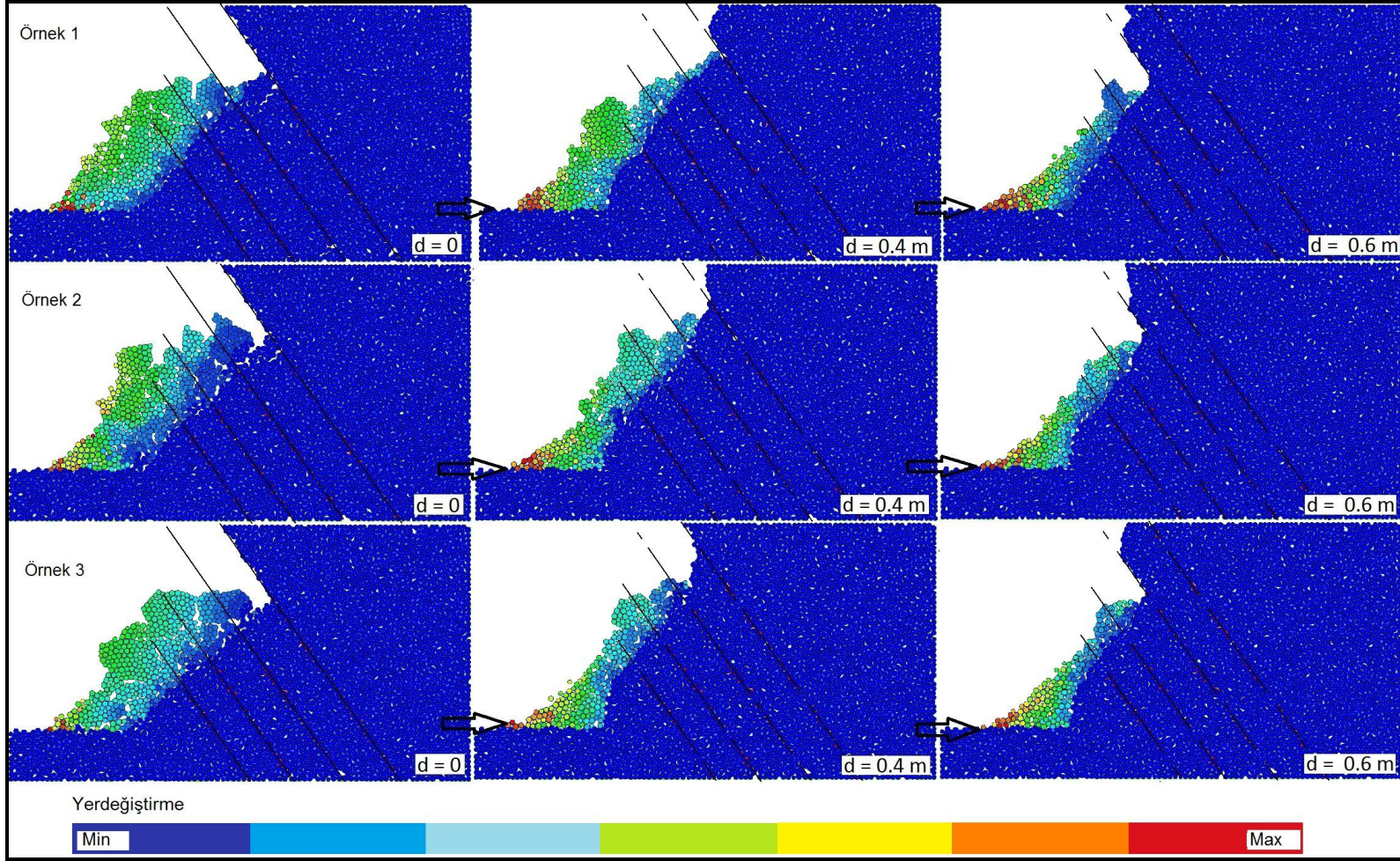
Şekil 4.18. Örnek türü ve kaya köprüsü aralığının gravite oranı ile olan ilişkisi



Şekil 4.19. Şev yüksekliği 10 m iken kaya köprüsü aralıklarına bağlı olarak yenilmenin başlaması



Şekil 4.20. Şev yüksekliği 10 m iken kaya köprüsü aralıklarına bağlı olarak yenilmenin gelişme evresi

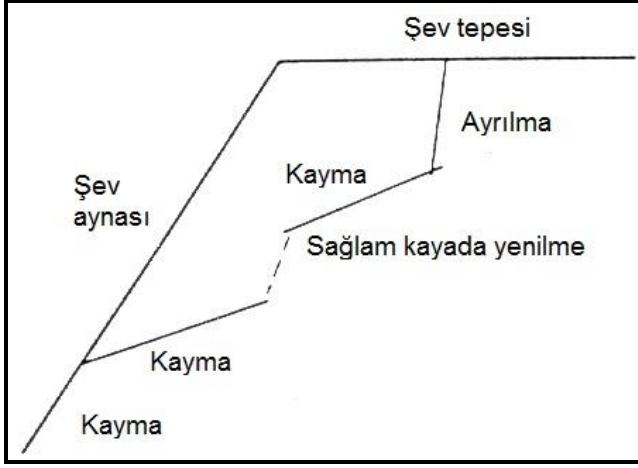


Şekil 4.21. Şev yüksekliği 10 m iken kaya köprüsü aralıklarına bağlı olarak yenilmenin sonlanmış hali

4.3.3. Basamaklı Şev Yenilmesi

Basamaklı şev yenilmelerinde, eklemlerin ve kaya köprülerinin dayanımlarının etkisi bilindiği gibi ilk olarak Jennings (1970) tarafından ele alınmıştır (Şekil 4.22). Daha sonraki yıllarda birçok araştırmaya konu olan bu çalışma, günümüzde nümerik yöntemler sayesinde şevlerin stabilitesinin anlaşılmasına yönelik referans bir çalışma olarak kullanılmaktadır (Camonés ve ark., 2013; Stead ve ark., 2006; Wong ve Wu, 2014; Zhang ve ark., 2007).

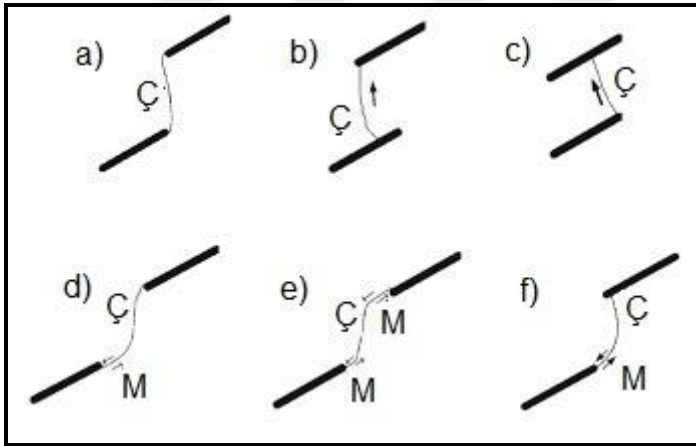
Yukarıdaki bölümlerde şev yenilmelerinde hem şeve ait geometrik özellikler, hem de kaya türleri, süreksizlik uzunluklarıyla bir kombinasyon halinde incelenmiştir. Bu bölümde ise şev geometrisi sabit kalmak koşuluyla aynı eklem paternine sahip olan farklı kaya türlerinin (örnek 1, 2 ve 3) yenilme davranışı ele alınmıştır. İlk olarak birden fazla düzlem boyunca 0.4 m aralıklı olan eklemler, 35° derecelik eğimle şev aynasını kesecek şekilde yerleştirilmiştir. Şev yüksekliği 10 m ve eğim açısı 75° olarak sabitlenmiştir. Şev limit denge koşuluna gelinceye kadar gravite artırma yöntemiyle kaydırıcı kuvvetler artırılmıştır (Çizelge 4.6). Süreksizliklerin içsel sürtünme açıları sırasıyla 10°, 20° ve 30° şeklinde artırılarak, şevlerin duraysızlığa geçtiği andaki yenilme davranışı her üç kaya türü için analiz edilmiştir (Şekil 4.24, 4.25, 4.26). Şev dayanımı kaya köprüsü ve süreksizlikler (eklemler) arasında dağıtılırken, kaya köprülerindeki gerilim konsantrasyonu, aslında süreksizlik yüzeyindeki dayanımın (sürtünmenin) bir fonksiyonudur (Scholtes ve Donze, 2015). Muller ve Martel (2000) bir kayada birbirine paralel eklemlerin uç kısımlarında biriken stresin, yüksek açılı eklemlerin açılmasına neden olduğunu ve bu şekilde söz konusu paralel eklemlerin birbiri ile bağlantılı hale geçtiğini belirtmiştir. Öyle ki, elde edilen modeller incelendiğinde aynı düzlem üzerinde veya birbirine paralel konumlanan eklemler arasındaki kaya köprüsü zonlarında çekme çatlaklarının geliştiği ve mevcut eklemlerin birbiriyle temas geçerek basamaklı bir yapıda yenilmeye başladığı görülmektedir. İlerleyen zaman aralıklarında, eklemler arasında makaslanan kaya malzemesi parçaları eğim aşağı düşerek parçalanmaktadır. İçsel sürtünme açısındaki artış, şevlerin yenilmeye başladığı andaki gravite değerlerini de arttırmıştır. Scholtes ve Donze (2015) daha tutucu eklem içsel sürtünme açılarında, söz konusu şevin dairesel yenilme yüzeyine sahip zayıf bir kaya kütlesi gibi davrandığını belirtmiştir. Bu araştırmacıların bulgularıyla benzer şekilde elde edilen analiz sonuçları, içsel sürtünme açısındaki artışa bağlı olarak kaya örneklerindeki yenilme yüzeyinin giderek daha dairesel bir şekil aldığını göstermiştir (Şekil 4.23). Mevcut eklemler artık kaya kütlesinin zayıflığı olarak çalışmamakta ve şevdeki yenilmeler süreksizlikler yerine, matrikste gelişmektedir.



Şekil 4.22. Basamaklı şev yenilme mekanizması

Çizelge 4.6. Eklemlerin içsel sürtünme açlarına göre şevlerin duraysızlığa geçtiği andaki gravite oranları

İçsel Sürtünme açısı ($^{\circ}$)	$F_{\text{örnek 1}}$	$F_{\text{örnek 2}}$	$F_{\text{örnek 3}}$
10	14	9	7
20	23	12	10
30	35	24	21



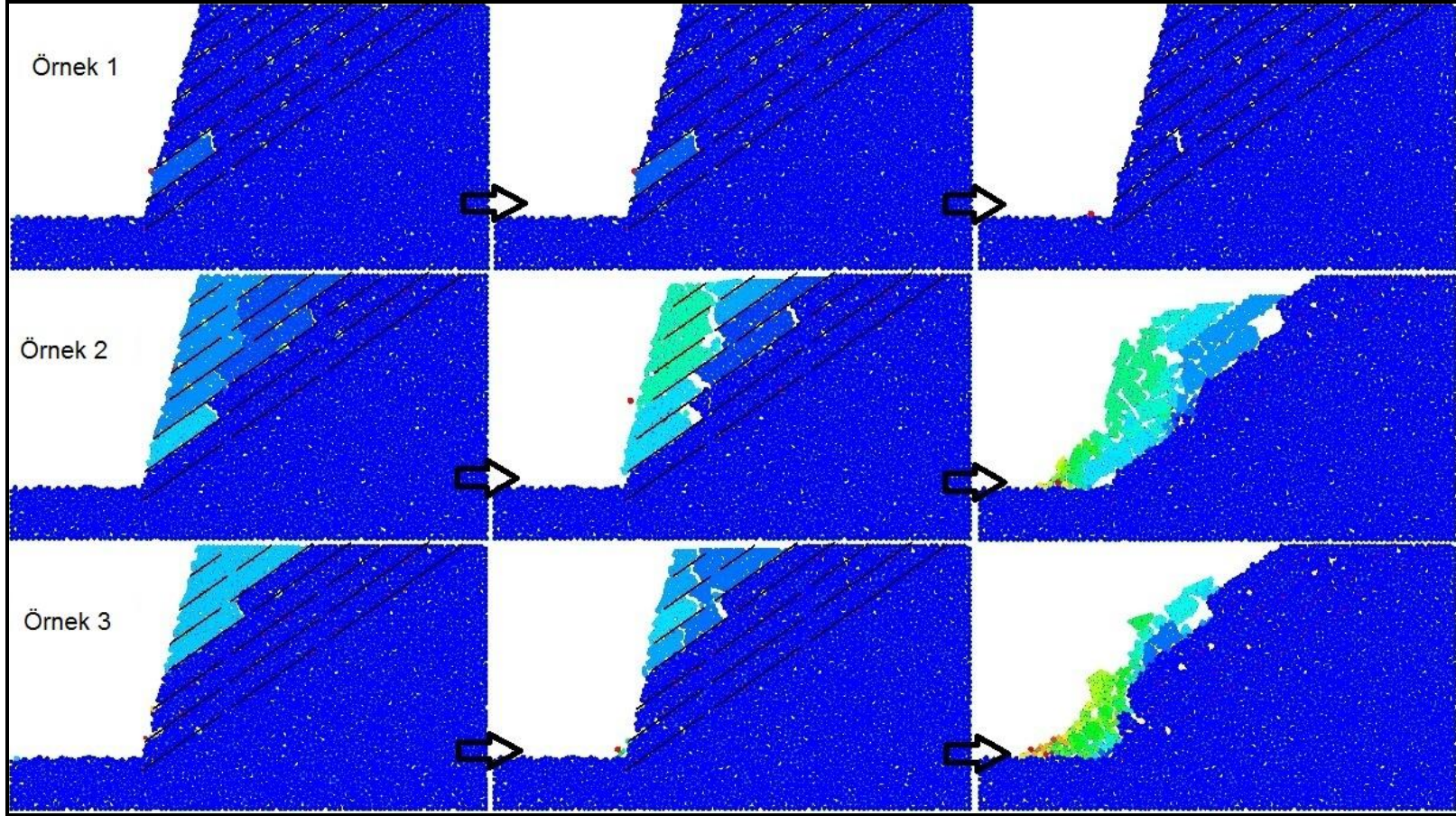
Şekil 4.23. Tek eksenli sıkışma altında eklemlerin birleşmesi veya kaya köprüsünde görülen yenilme (Wond ve Einstein, 2009)

Kaya kütlelerindeki eklemlerin birbirleriyle birleşme eğilimi kaya mekaniğinde önemli bir araştırma konusudur. Özellikle tek eksenli gerilim koşullarında incelenen bu davranış Wong ve Einstein (2009) ve Zhang ve Wong (2013)'un çalışmalarına da konu olmuştur. Ancak bu tür birleşme veya mevcut eklemlerin ilerleme eğilimleri yalnızca dış kuvvetlere bağlı olarak değil, içsel kuvvetlerin yeniden dağılımıyla da gelişebilir. Genel olarak basamaklı

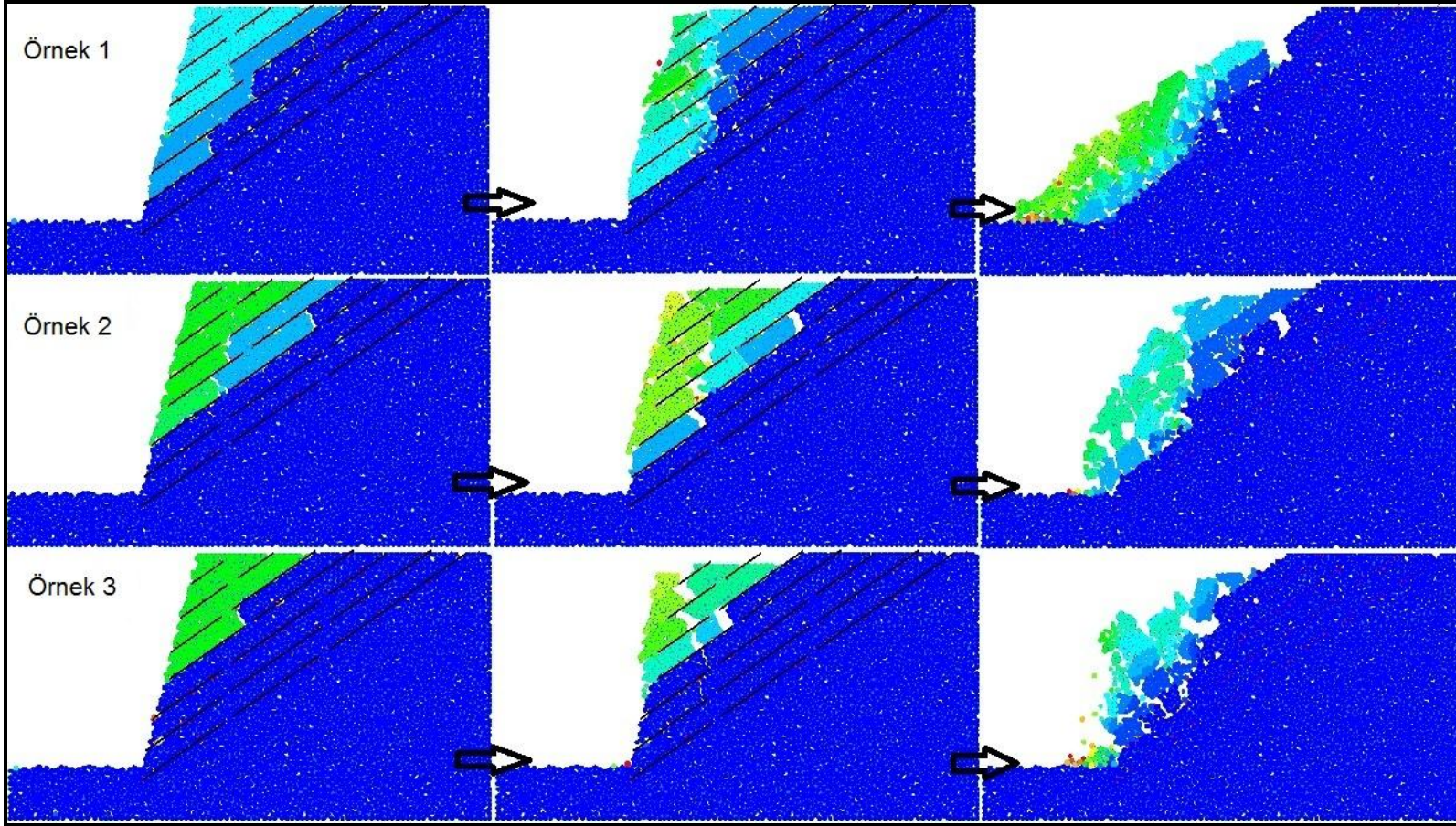
şev yenilmesinde gravite etkisi altında meydana gelen progresif yenilme süreci 4 aşamada özetlenebilir;

- i. Elastik deformasyonun oluşması,
- ii. Alt kısımlardaki kaya köprülerinin yenilmesi,
- iii. Kaya köprülerindeki yenilmenin üst kısımlara doğru ilerlemesi,
- iv. Yayılan çatlakların bloklara geçişi ve bu blokların basamaklı yenilme yüzeyi boyunca kayması şeklindedir. Bu sebeple şevlerde iyileştirme (destekleme) öncelikle şevin topuk kısmında veya alt kısımda uygulanmaktadır (Huang ve ark., 2015).

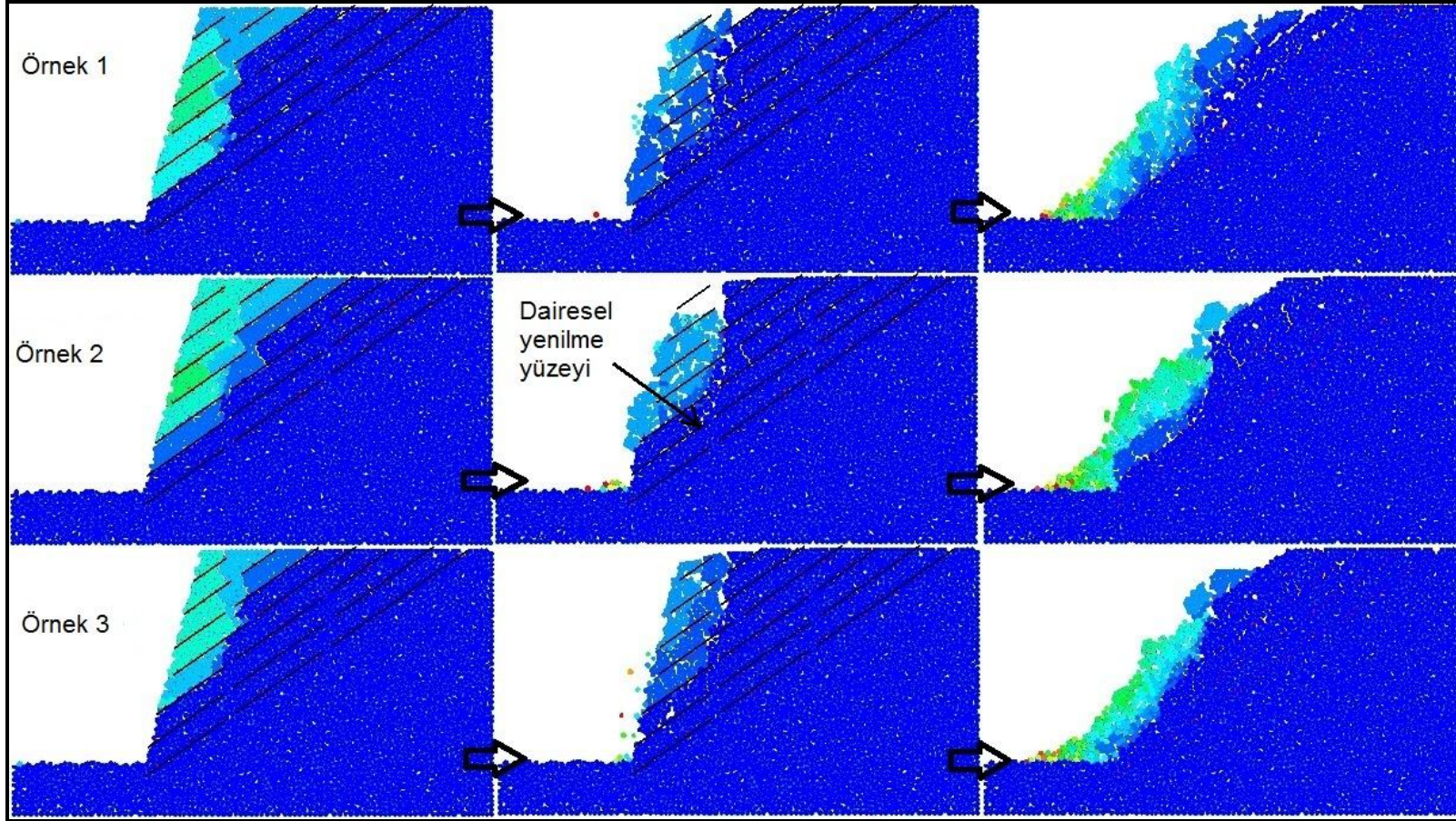




Şekil 4.24. Süreksizliklerin içsel sürtünme açısı 10° olan kesikli eklemli (devamlı olmayan) şev modellerindeki basamaklı yenilme mekanizması



Şekil 4.25. İçsel sürtünme açısı 20° olan kesikli eklemlili (devamlı olmayan) şev modellerindeki basamaklı yenilme mekanizması



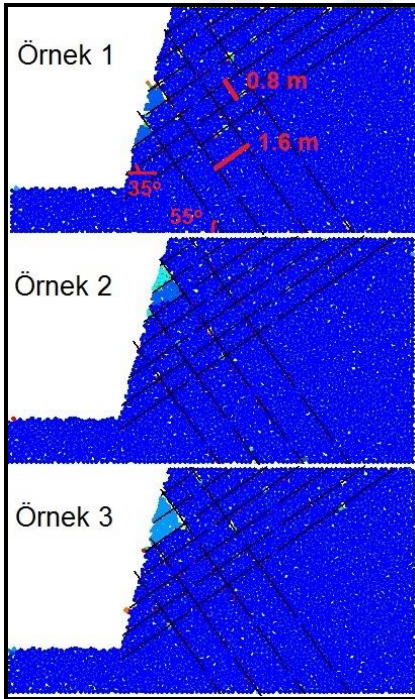
Şekil 4.26. İçsel sürtünme açısı 30° olduğunda şevlerdeki basamaklı yenilme mekanizması

4.3.4. Birden Fazla Eklem Seti İçeren Şevlerdeki Yenilme Mekanizması

Doğada tek bir yönde gelişen eklemler içeren kaya şevlerinden ziyade, genellikle birden fazla yönelime sahip eklem sistemlerinden oluşan jeolojik yapılarla karşılaşmaktadır. Bu amaçla bu bölümde eklem yoğunluğu dikkate alınarak farklı eğim yönlerinde iki eklem setinden ve üç eklem setinden oluşan şevlerdeki yenilme mekanizmaları incelenmiştir.

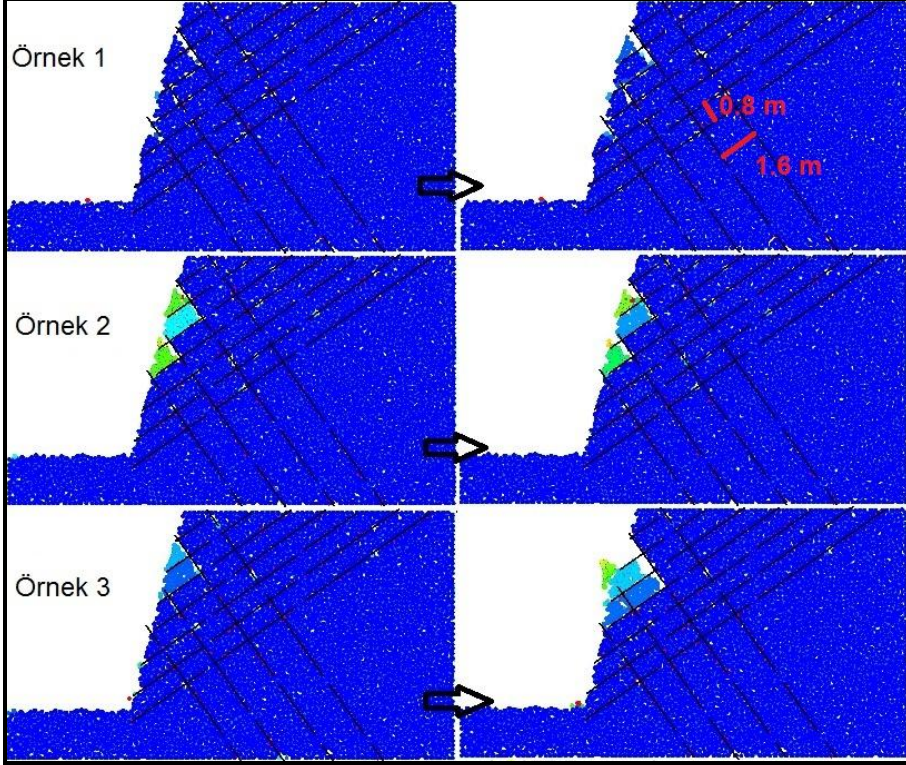
i. İki eklem setli şevlerde gelişen yenilmeler

Birbirine zıt yönde eğimli, 35° ve 55° eğim açılı eklem setleri 10 m yüksekliğindeki ve 75° eğim açısındaki şevlere atanmıştır (Şekil 4.27, 4.28 ve 4.29). Eklemler 0.4 m kaya köprüsü aralığı içermekte ve 0.8 m, 1.6 m aralıklarla sıralanmaktadır. Eklemlerin içsel sürtünme açısı 10° , 20° ve 30° olarak arttırılmış ve genel olarak tüm modellerde (30° sürtünme açılı eklemlerle kesilen Örnek 1'e ait şev modeli dışında) şevler $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ değerinde duraysız olduğundan, bu kısımda gravite artırma yönteminin kullanılmasına gerek kalmamıştır. Farklı yönelimlerdeki eklemler iki boyutlu ortamda bloklar oluşturmakta ve içsel sürtünme açısının 10° 'ye azalması bu blokların süreksizlik kontrollü olarak kaymalarına neden olmaktadır (Şekil 4.29).

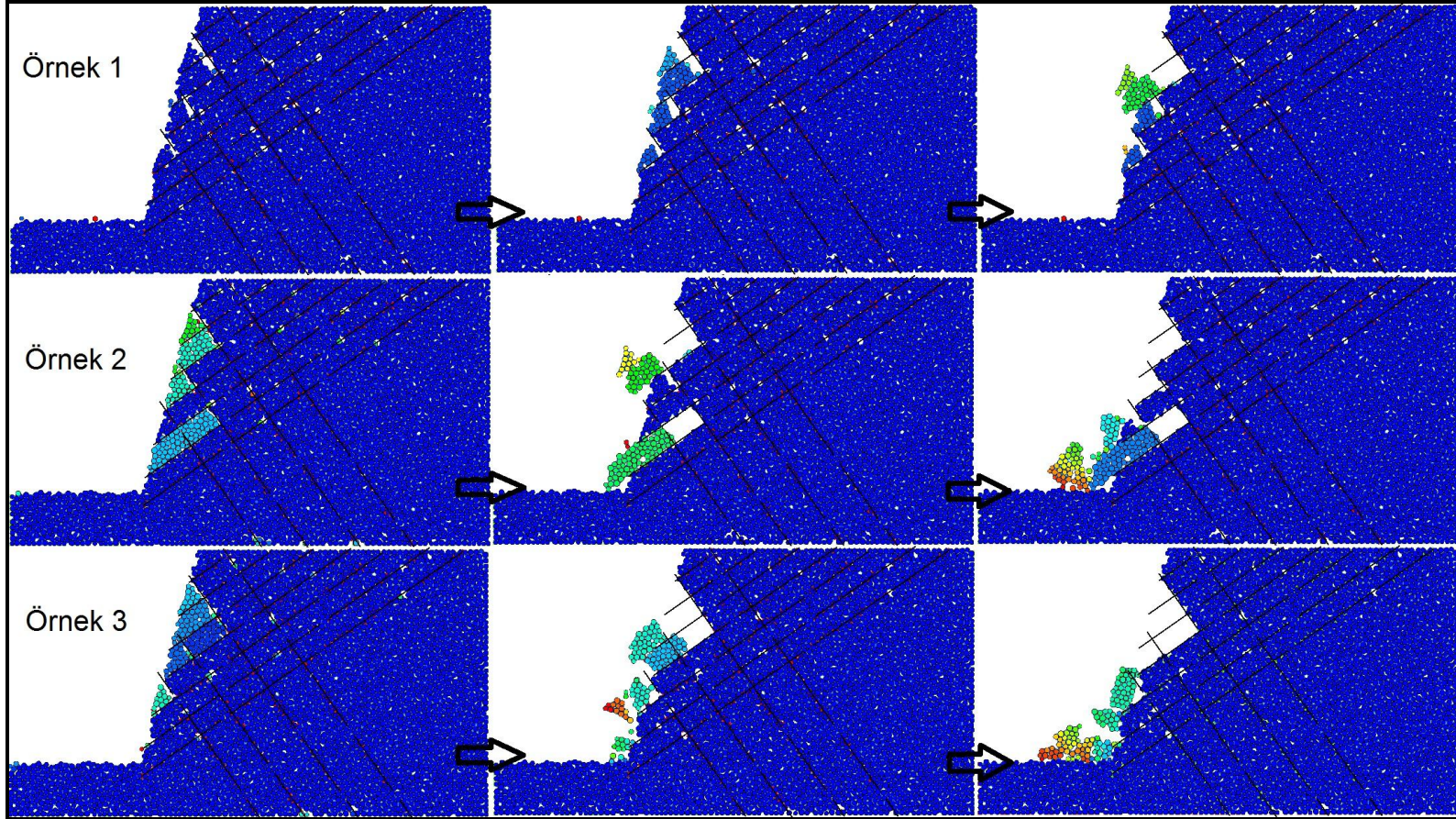


Şekil 4.27. Eklemlerin içsel sürtünme açısı 30° ve $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ iken şev stabilite durumu

Genel anlamda gravite artırma yöntemine gerek kalmadan şevlerin mevcut eklemli yapılarıyla duraysızlığa geçmesi, bir kaya kütesinin dayanımının eklem yoğunluğundaki artışa bağlı olarak azaldığının bir göstergesidir.



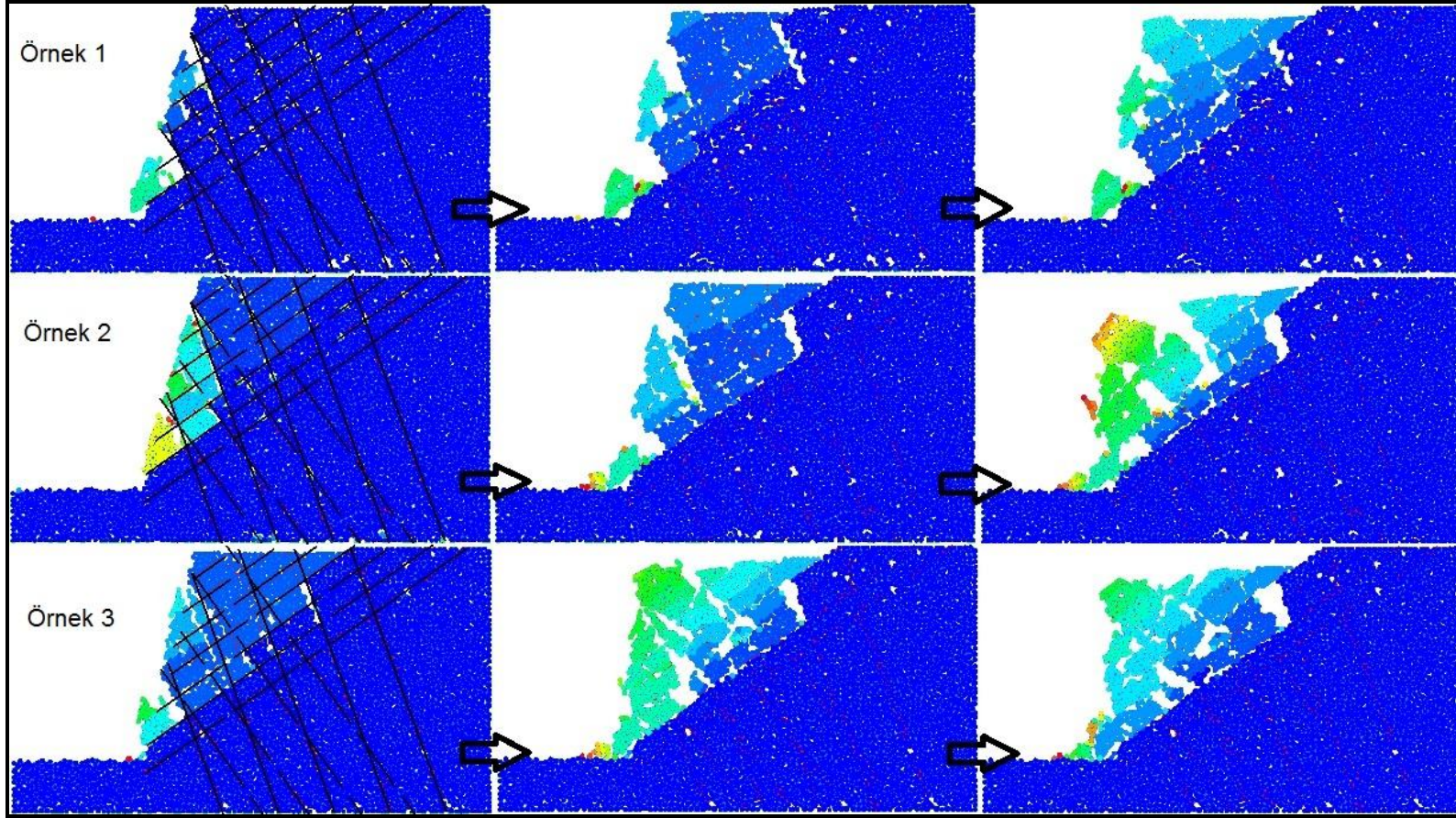
Şekil 4.28. Eklemlerin içsel sürtünme 20° iken şevlerde meydana gelen yenilmeler



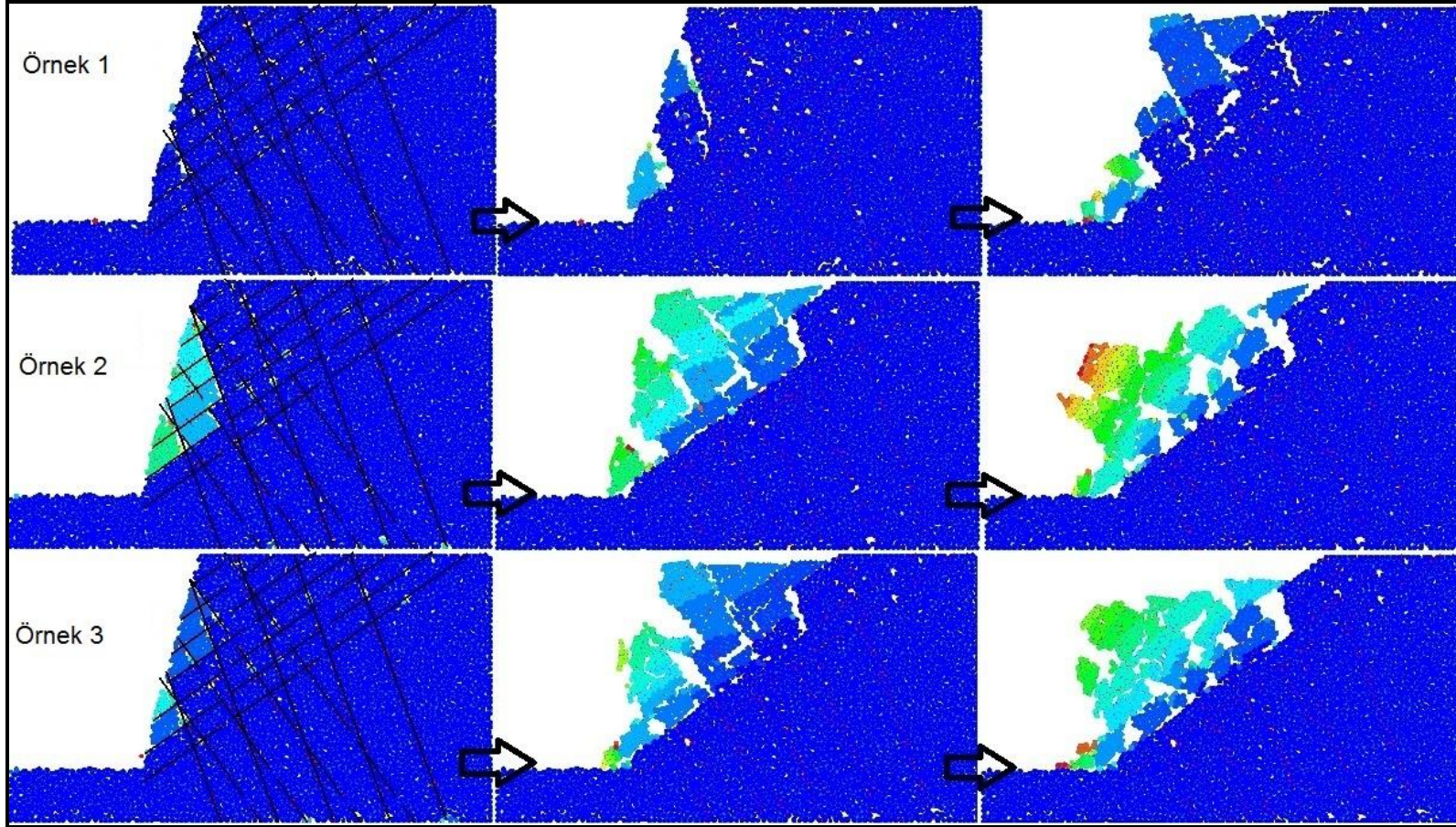
Şekil 4.29. Eklemlerin içsel sürtünme açısı 10° iken şevlerin yenilme mekanizması

ii. Üç eklem setli şevlerde yenilme mekanizması

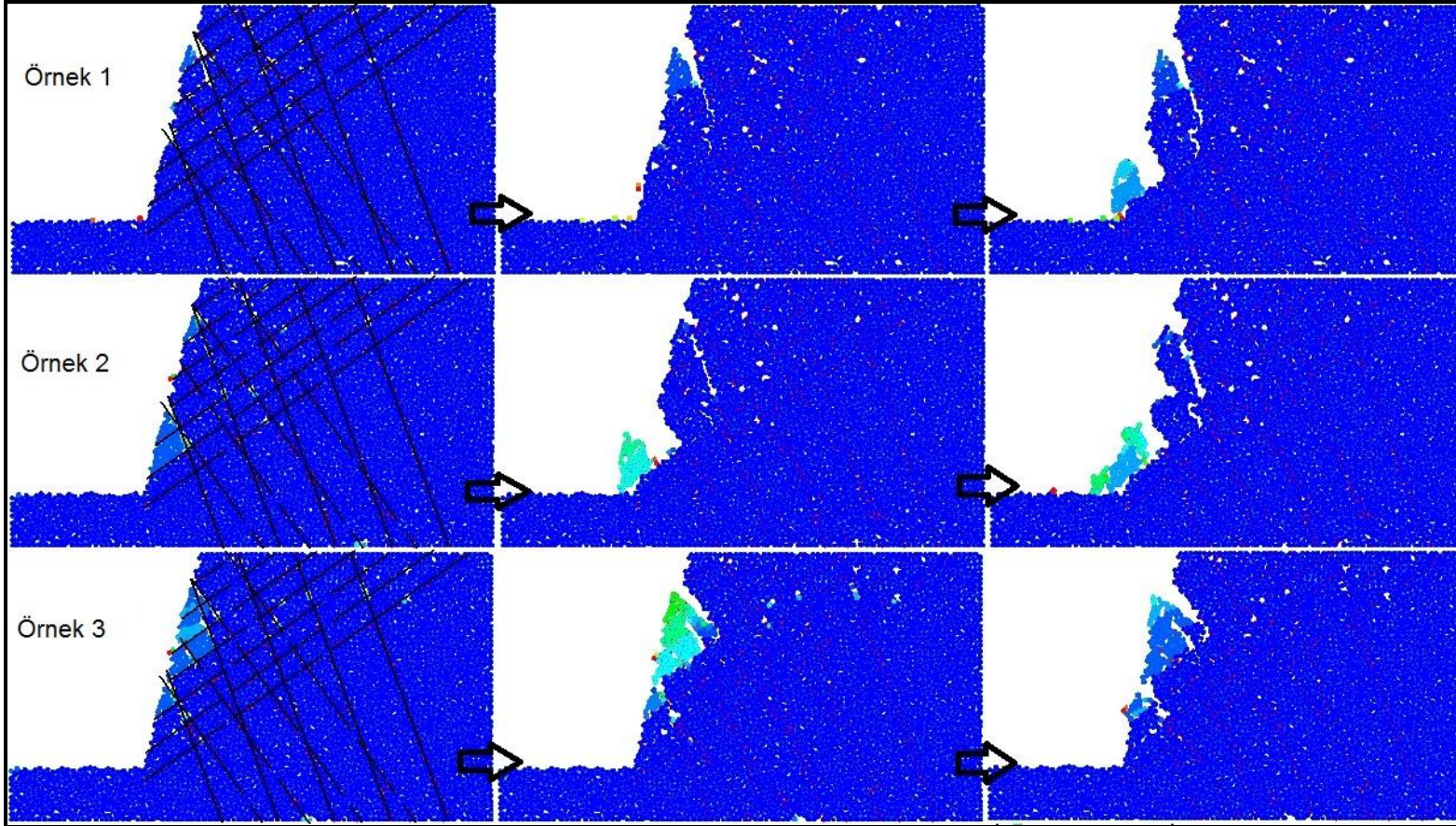
Bu bölümde eklem seti sayısı üçe çıkartılmış ve bu şekilde eklem yoğunluğunun şev yenilmelerine etkisi daha iyi gözlemlenebilmiştir. Bu haliyle tüm modeller $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ gravite değerinde duraysızdır. 55° ve 70° şev içine doğru eğimlenmiş iki eklem seti ve 35° eğimle şev aynasını kesen bir eklem setinden oluşan modellerde, eklemlere ait içsel sürtünme açısı değerleri bir önceki bölümde olduğu gibi 10° , 20° ve 30° olarak alınmıştır. Şev yüksekliği 10 m ve şev eğim açısı 75° olarak sabitlenmiştir. 55° ve 35° eğim açılı eklemler bir önceki bölümde olduğu gibi 0.4 m genişliğindeki kaya köprüleriyle kesilmiştir. Buna karşılık 70° eğim açılı eklemler ise devamlı eklemler olarak ele alınmıştır. Genel olarak modeller incelendiğinde baskın eklem şevin içine doğru yönelmiş olan 70° lik eğim açılı eklem olduğu görülmektedir. Öyle ki, eklem sınırlarından itibaren gelişen ayrılma öncelikle bu eklemler boyunca başlamaktadır (Şekil 4.30, 4.31 ve 4.32). Kaya köprüsü aralıkları yenilmedeki baskın eklem yönünü etkilemiştir. 10° ve 20° içsel sürtünme açısına sahip eklemlerin olduğu modellerde, malzemeler öncelikle üç eklemle bloklanmış ve daha sonra bu bloklar 35° eğimli eklem üzerinde devrilerek yenilmeye geçmiştir. 10° içsel sürtünme açısında ve özellikle örnek 3'e ait modellerde bu yenilmenin şevin daha gerisinden başladığı görülmektedir (Şekil 4.30). İçsel sürtünme açısı 30° 'ye çıktığında ise yenilme blok devrilmesinden, bükülmeli devrilme türüne dönüşmüştür (Şekil 4.32). Ancak örnek 1'e ait modellerde ilerleyen zaman adımlarında bükülerek ayrılmaya başlayan malzemenin, kısmi olarak geriye doğru yatma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 4.32). Bu durum, içsel sürtünme açısının şev yenilme mekanizması üzerindeki etkisini göstermektedir.



Şekil 4.30. Eklemlerin içsel sürtünme açısı 10° iken şevlerin yenilme mekanizması



Şekil 4.31. Eklemlerin içsel sürtünme açısı 20° iken şevlerin yenilme mekanizması



Şekil 4.32. Eklemlerin içsel sürtünme açısı 30° iken şevlerin yenilme mekanizması

Modeller, var olan eklemlerin ve içsel sürtünme açısının yeni eklem oluşumuna etkisini ve kaya malzemesi dayanımının 25 MPa'ın altında olduğu durumlarda, kaya türünün yenilme mekanizması üzerinde belirgin bir değişiklik oluşturmadığını göstermiştir.

4.4. Nümerik Sonuçların Vaka Üzerinde Test Edilmesi

İlk kez Lorig ve Varona (2001) tarafından tanımlanan kaya kütlesi şev problemlerinden olan ve ileriki yıllarda Galera Fernández ve Valesco (2002), Hammah ve ark. (2007) ve Garcia ve Rodolfo (2015)'nin çalışmalarına da konu olmuş iki vaka, tez sonucu performansının test edilmesi için seçilmiştir. En ayrıntılı veri paylaşımını içermesinden dolayı Hammah ve ark. (2007)'nin çalışması referans çalışma olarak kabul edilmiştir. Bu vakalarda, ayırık elemanlar yöntemine dayanan UDEC programı ve sonlu elemanlar yöntemine dayanan Phase2 programı kullanılarak 260 m yüksekliğinde, 55° eğim açısında süreksizlikler içeren bir şevdeki yenilme mekanizması ve güvenlik katsayıları karşılaştırılmıştır. UDEC modelinde ve Phase2 modelinde belirlenen güvenlik katsayıları dayanım azaltma yöntemi (SSR) kullanılarak hesaplanmıştır. Gravite arttırma yönteminden farklı olarak, bu yöntemde Mohr-Coulomb yenilme zarfının " $T = c + \sigma \tan \phi$ " eşitliğinde c veya $\tan \phi$ değerinde bir azaltma yapılarak, malzemenin yenilmeye başladığı andaki makaslama parametresi değerinin (c veya $\tan \phi$) ilksel c veya $\tan \phi$ değerine olan oranı o şevin güvenlik katsayısı değerini vermektedir. Söz konusu vakalarda kaya malzemesine ait birim hacim ağırlık, kohezyon, içsel sürtünme açısı, deformasyon modülü gibi parametreler verilmişken, σ_c ve σ_t değerleri hakkında herhangi bilgiden bahsedilmemiştir. Bu nedenle var olan verilerden yola çıkarak Rocklab (Rockscience, 2011) programında kaya malzemesine ait tek eksenli sıkışma dayanımı ve çekme dayanımı hakkında bir yaklaşımda bulunulmuştur (Çizelge 4.8). Kaya malzemesinin makro özelliklerini yansıtacak mikro parametreler Çizelge 4.7'de gösterilmektedir. Bu mikro parametreler 4 m yüksekliğinde ve 2 m genişliğindeki bir örneğe atanmış ve tek eksenli sıkışma dayanımı, çekme dayanımı deneyleriyle örneğin σ_c , σ_t ve E değerleri kalibre edilmiştir. Çizelge 4.8, vakada belirtilen kaya malzemesine ait parametreler ile nümerik analizlerden elde edilen makro parametreleri göstermektedir.

Çizelge 4.7. Kaya malzemesinin nümerik analizlerden elde edilen mikro ve makro parametreleri

Mikro Özellik	
Partikül çapı	0.08-0.12 m
Yoğunluk	2660 kg/m ³
Efektif modül (emod)	20 GPa
Rijitlik oranı (krat)	2
Çekme dayanımı (Pb_ten)	4.1 MPa
Kohezyon, (Pb_coh)	10.2 MPa
Sürtünme açısı (Pb_fa)	42.38°
Porozite	0.1
Damping oranı	0.7
Lineer Kısım	
Efektif modül (emod)	20 GPa
Rijitlik oranı (krat)	2
Sürtünme katsayısı	0

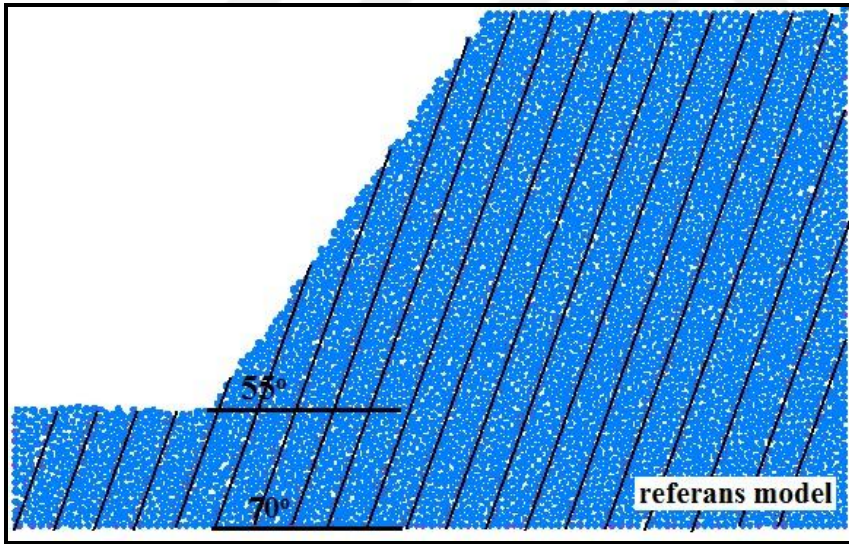
Çizelge 4.8. Kaya malzemesi ve süreksizliklere ait makro özellikler

Özellik	Vakalarda kullanılan parametreler	Nümerik analizlerden elde edilen parametreler
Birim hacim ağırlık, γ (kN/m ³)	26.1	26.1
Kohezyon, c (MPa)	0.675	0.674
İçsel sürtünme açısı, ϕ (°)	43	42.38
Elastisite modülü, E (GPa)	3.6	3.57
Sıkışma dayanımı (MPa)	3.3 _(Rocklab)	3.99
Çekme dayanımı (MPa)	0.347 _(Rocklab)	0.15
Süreksizlik özelliği		
Kohezyon	0	0
İçsel sürtünme açısı (°)	40	40
Eğim açısı (°)	i.70/090 ii. 20/090-70/270	i.70/090 ii.20/090-70/270
Aralık (m)	i.20 ii.20-30	i.1 ii.1-1.5

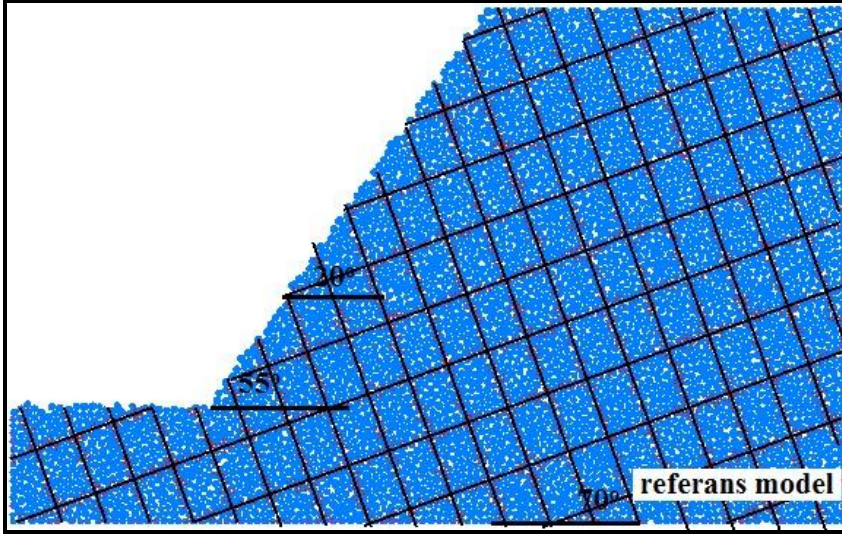
Çizelge 4.9. Eklemlerin smooth-joint yöntemine göre belirlenen mikro parametreleri

Parametre	
Normal rijitlik, sj_kn (GPa)	10
Makaslama Rijitliği, sj_ks (GPa)	10
Sürtünme, sj_fric ($\tan\phi$)	0.839
Kohezyon, sj_coh (MPa)	0
Çekme dayanımı, sj_ten (MPa)	0

Araştırmacıların modellediği şev 260 m yükseklikte ve birinci vakada 20 m aralıklı eklemlerle, ikinci vakada ise 20 ve 30 m aralıklı eklemlerle kesilmektedir. PFC'de bu değerler (20:1 oranında küçültülerek) yükseklik için 13 m ve eklem aralığı için 1 m ve 1.5 m olarak ayarlanmıştır. Birinci vakada 55° eğimli olan şev, 70° eğimle şev aynasına doğru uzanan eklemlerle kesilmektedir (Şekil 4.33). İkinci vakada ise yine 55° eğim açısına sahip olan şev (şevin eğim yönü 090° olarak alınmıştır), bu kez hem 20° şev aynasına doğru eğimlenmiş eklemlerle, hem de 70° eğimle şev içine doğru uzanan eklemlerle kesilmektedir (Şekil 4.34). Eklemlere ait mikro parametreler Çizelge 4.9'da verilmektedir.



Şekil 4.33. Vaka I: Şevin ilksel geometrisi



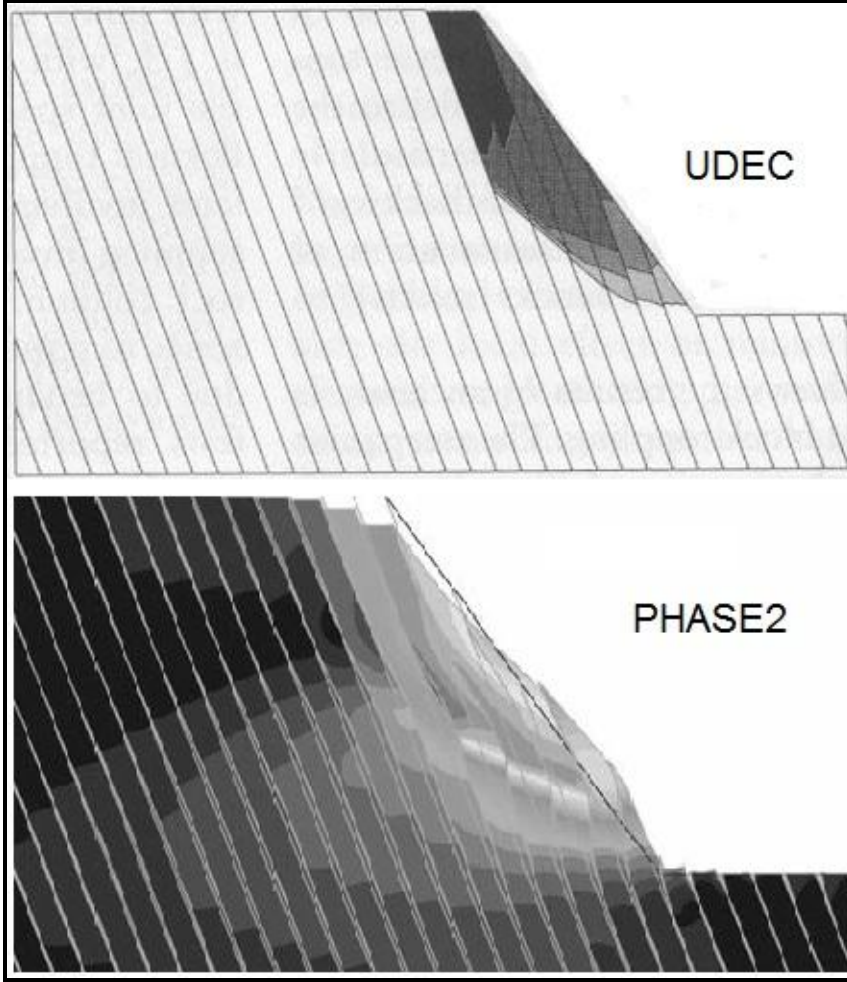
Şekil 4.34. Vaka II: Şevin ilksel geometrisi

Çizelge 4.10. Vakalara ait gravite oranları

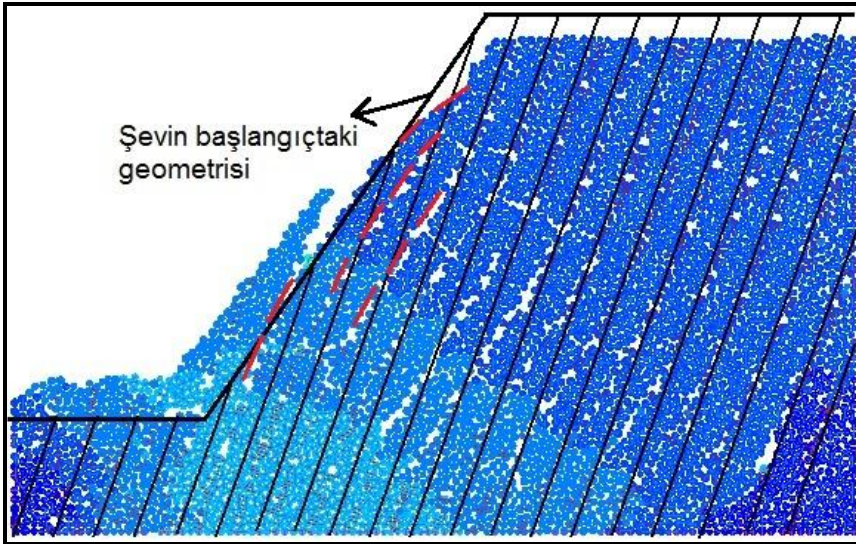
Gravite oranı	I. Vaka	II. Vaka
F	2.5	2

PFC'de dayanım azaltma yöntemi uygulanamadığından, şevin stabilitesinin bozulması, önceki bölümlerde olduğu gibi gravite arttırma yöntemiyle yapılmıştır. Bu nedenle UDEC ve Phase2 yazılımlarından elde edilen güvenlik katsayısı değerleri, PFC'den elde edilen gravite oranlarıyla karşılaştırılmamaktadır (Çizelge 4.10). Dolayısıyla gravite arttırma yönteminin genel olarak şev stabilitesi hakkında kabaca bir yaklaşım sunduğu da unutulmamalıdır.

Yukarıda ilksel geometrileri tanımlanan şev vakalarına ait UDEC ve Phase2'dan elde edilen model sonuçları ile PFC2D'den elde edilen model sonuçları Şekil 4.35 ve 4.36'da verilmiştir.



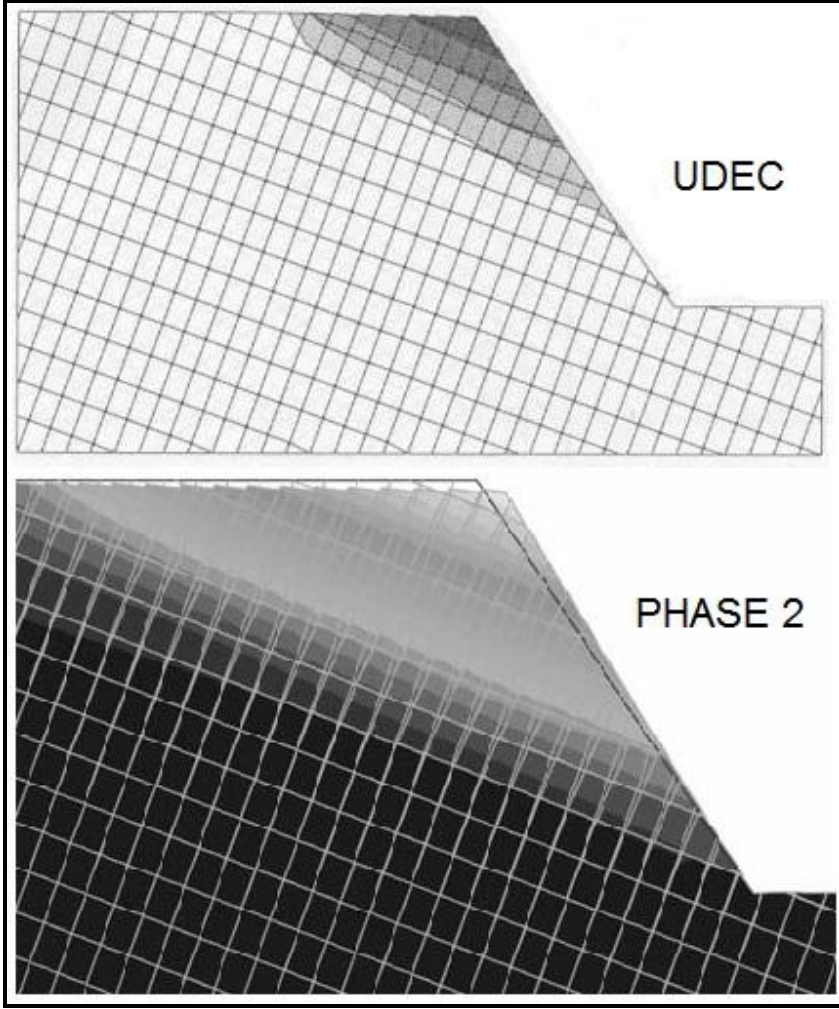
Şekil 4.35. Ayrık elemanlar ve sonlu elemanlar yöntemlerine dayalı yazılımlardan elde edilen I. vakaya ait model sonuçları (Hammah ve ark., 2007)



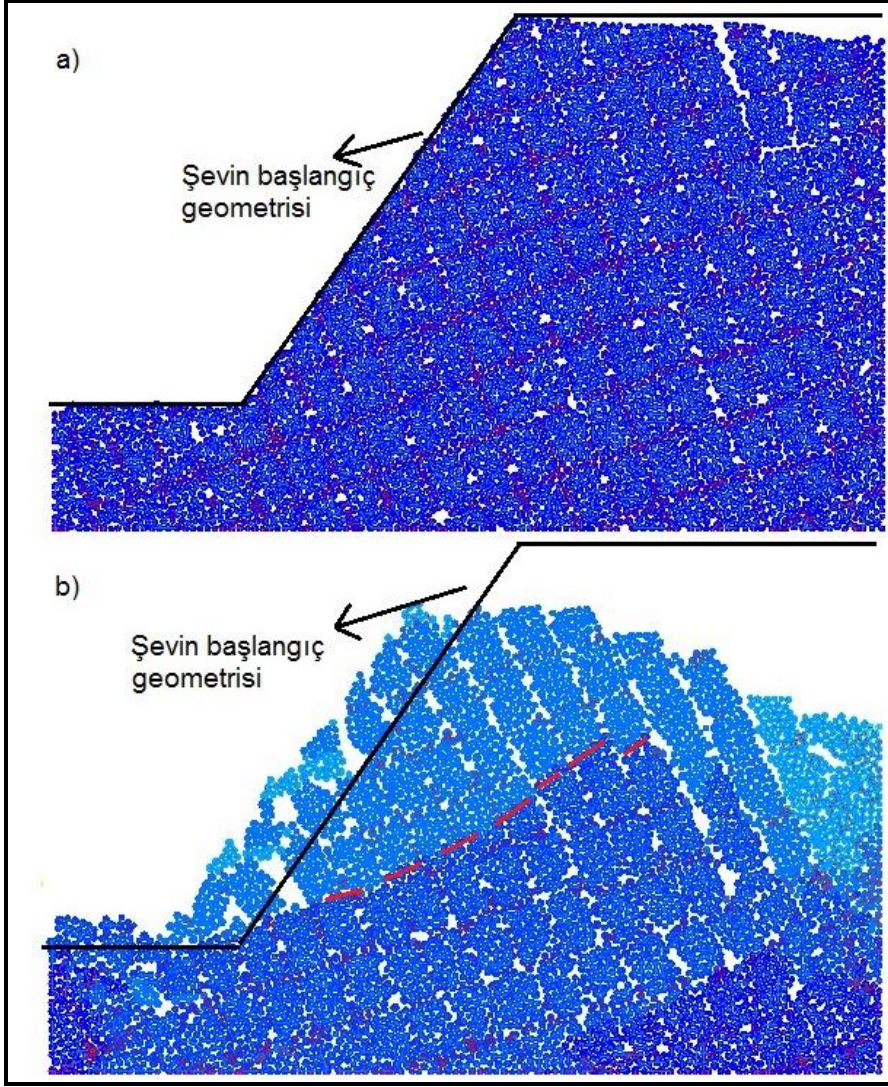
Şekil 4.36. PFC'den elde edilen şev yenilme mekanizması

Şekil 4.35 ve 4.36 incelediğinde PFC'den elde edilen model sonucunun sonlu elemanlar yöntemine dayanan Phase2 model sonucu ile daha uyumlu olduğu görülmüştür. PFC'de eklemler şev aynasına doğru bükülme davranışı sergilemiş ve bu eğilim mevcut eklemlere dik yönde gelişen çekme çatlaklarının (wing cracks) oluşmasına sebep olmuştur. UDEC'den elde edilen modelde ise kısmen dairesel bir kayma yüzeyinin oluştuğu ve malzemenin herhangi bir bükülme davranışı sergilemediği görülmektedir.

İkinci vakaya ait sonuçlar karşılaştırıldığında yine PFC'den elde edilen yenilme mekanizmasına ait model sonuçlarının Phase2 model sonucuna daha yakın olduğu söylenebilir (Şekil 4.37 ve 4.38). PFC'deki yenilme mekanizması, öncelikle şevin gerisinde başlamış, şev içine doğru eğimlenmiş eklemlerin kontrolü altında bükülme davranışıyla gelişmiştir (Şekil 4.38-a). Bu bükülme davranışı ilerleyen zaman adımıyla yerini blokların devrilmesine bırakmış, bir yandan bloklar birbirini üzerine devrilirken, bir yandan da şev aynasına doğru eğimlenen eklemler (20°) devreye girmiştir. 20° eğimli olan eklemlerin eğim yönlerinde yarı dairesel bir kayma yüzeyi oluşmuştur. Artık bloklar hem devrilmekte, hem de kütle halinde yeni oluşan yarı dairesel kayma yüzeyinde hareket etmektedir (Şekil 4.38-b). Bu şekliyle incelendiğinde PFC ile yapılan analizin Phase2 ve UDEC analizlerine göre daha ayrıntılı sonuçlar ürettiği görülmektedir.



Şekil 4.37. Ayrık elemanlar ve sonlu elemanlar yöntemlerine dayalı yazılımlardan elde edilen II. vakaya ait model sonuçları (Hammah ve ark., 2007)



Şekil 4.38. PFC'den elde edilen ikinci vakaya ait model sonuçları

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

Son yıllarda sıklıkla kullanılan nümerik analizler, mühendislik yapılarına temel olan kaya kütlelerinin davranışının belirlenmesinde oldukça kuvvetli bir yöntem olmuştur. Öyleki bu yöntemler laboratuvar deneylerinde ya da görgül eşitliklerde dikkate alınamayan ölçek etkisi, mikro çatlak, anizotropi gibi özelliklerin araştırılmasına da olanak sağlamaktadır. Ancak hala arazideki tüm gerilim koşullarıyla bir kayanın davranışını modellerken bazı kısıtlamalarla karşılaşmaktadır. Farklı gerilimler altında farklı davranış gösteren bir kaya kütlesi bilindiği gibi yarı-statik (quasi-statik) bir koşulda bulunmaktadır. Bu nedenle modelleme sırasında malzemenin mümkün olduğu kadar bu sınıra (yarı-statik) getirilmesi gerekmektedir. Böylece nümerik hesaplamaların, malzemenin gerçek davranışını değiştirmeyeceği temin edilebilir. PFC2D'de söz konusu sınır "damping oranı" ve "denksiz kuvvetler" ile kontrol edilmektedir.

Bu tez çalışması, sayısal modelleme yoluyla şev geometrisi, süreksizlik özelliği ve kaya malzemesi türünün, kaya kütlelerinin yenilme davranışlarını nasıl etkilediğini göstermiştir. Analizler sırasında dikkat edilmesi gereken iki önemli nokta tespit edilmiştir;

a. Flat joint yöntemi her ne kadar kaya malzemeleri için daha uygun bir method olsa da (Agramonte ve ark., 2014; Esmaili ve ark., 2015; Poulsen ve Adhikary, 2013; Bahrani ve ark., 2012 etc), kaya şevi uygulamalarında smooth-joint yöntemiyle birlikte uyumlu olarak çalışmamıştır. Mühendislik yapılarına uygulanabilirliği farklı vakalarla test edilmelidir.

b. Nümerik ortamda yapılan tek eksenli sıkışma analizinde, örnek ile duvarlar arasında sürtünmesiz bir yüzey oluşturulmaktadır. Ancak laboratuvar da yüklem plakalarıyla malzeme arasında sürtünmesiz bir yüzey oluşup oluşmadığı kontrol edilememektedir. Örneğin laboratuvar deneyinden 25 MPa olarak belirlenen tek eksenli sıkışma dayanımı, nümerik analizlerde 21-22 MPa olarak elde edilebilir. Bu farklılıkların dikkate alınması, nümerik sonuçların laboratuvar deneyleriyle kalibrasyonunda önemlidir.

Zayıf dayanımlı kayaların yenilme mekanizmalarını incelemek için kalibrasyonu yapılan kaya malzemeleri, özellikle tek eksenli sıkışma dayanım değerleri 25 MPa'ın altında olacak şekilde seçilmiştir. Sırasıyla düzlemsel yenilme, devrilme türü yenilme, basamaklı ve çok eklem setli şevlerdeki yenilme mekanizması PFC2D ayırık elemanlar kodu kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenmektedir :

i. Düzlemsel kaymada kaya köprülerinin varlığı, bu aralıkların alt ucunda stresin birikmesine, çekme çatlaklarının oluşumuna ve bu çatlakların şev aynası veya şev tepesi ile birleşerek şevin yenilmesine neden olmaktadır. Dolayısıyla yenilmenin şevin neresinde gelişeceği, kaya köprüsü aralıklarının konumlarına bağlıdır.

ii. Düzlemsel kayma mekanizmalarında şev yüksekliğinin artması, yenilen malzeme miktarını arttırmakta, şev eğim açısının artışı ise yalnızca yenilen malzemenin hızında bir artışa neden olmaktadır. Dayanımı yüksek olan malzeme kayma yüzeyi boyunca daha sıkı kenetlenmiş bir şekilde hareket ederken, dayanımın azalmasıyla birlikte daha fazla parçalanma meydana gelmektedir.

iii. Kaya köprülerinin varlığı devrilme türü kayma mekanizmasında, yenilme yüzeyinin düzlemselden, yarı dairesel bir şekle dönüşmesine neden olmuştur.

iv. Devrilme türü yenilme mekanizmalarında şev yüksekliğindeki artış, içsel kuvvetleri de arttırmakta ve yenilme davranışı 8 m yüksekliğindeki şevlerde daha çok zeminlerde görülen toprak kayması gibi bir trend sergilerken, yüksekliğin 10 m'ye çıkması yenilme şeklini bükülme türü devrilmeye çevirmektedir.

v. İki farklı yönde süreksizlik içeren şev sistemlerinde, süreksizliklerin içsel sürtünme açısı yenilmeyi kontrol etmektedir. Öyleki bu değer 20° veya 30° olduğunda söz konusu şevde belirgin bir yenilme gözlenmezken, açısının 10° 'ye düşmesiyle bloklara ayrılan malzemeler basamaklı bir yapı sunacak şekilde hareket etmektedir.

vi. Üç eklem setli şevlerde içsel sürtünme açısındaki artış yenilme mekanizmasını blok türü devrilmeden, bükülmeli-devrilme türüne dönüştürmüştür. İçsel sürtünme açısının 30° 'ye çıkmasıyla partiküller birbirine daha fazla kenetlenmiştir.

vii. Nümerik analiz sonuçları Hammah ve ark. (2007) tarafından ele alınan iki şev yenilme vakası üzerinde test edilmiştir. Araştırmacılar Phase2 ile UDEC modellerinin sonuçlarını birbirleriyle karşılaştırmış ve bu iki programın oldukça yakın yenilme mekanizmaları elde ettiklerini belirtmiştir. PFC ile aynı şev vakaları tekrar test edilmiş, Phase2 ile edilen sonuçların PFC'den elde edilen sonuçlar ile kısmen daha uyumlu olmasının dışında, PFC'nin yenilme davranışlarını daha ayrıntılı bir şekilde (devrilme-bükülme-dairesel yenilme mekanizmaları) modellediği belirlenmiştir.

Hem düzlemsel hem de devrilme türü yenilme mekanizması çekme dayanımının kontrolü altındadır. Ancak bilindiği gibi arazi koşullarında bir kaya malzemesi mikro çatlaklar veya fisürler içerebilir. Dolayısıyla bu çatlakların varlığının dayanım üzerinde

daha fazla bir azalmaya neden olacağı gelecekte yapılacak çalışmalarda göz önünde bulundurulacaktır.

Bu tez kapsamında yapılan tüm çalışmalar TÜBİTAK 114M852 nolu araştırma projesi tarafından desteklenmiştir. Tez süresince 6 uluslararası, 3 ulusal bildiri (uluslararası bildirilerden 3 tanesi doktora tez konusuyla ilgilidir) ve SCI kapsamındaki dergiler için 2 adet uluslararası makale hazırlanmıştır.



KAYNAKLAR

- Agramonte F. A. E., Junior E. A. V., Figueiredo R. P., Camones L. A. M., 2014. Application of the Discrete Element Method for Modelling the Block and Flexural Toppling Mechanisms in Rock Slopes, Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure SBMR 2014 – ISRM Specialized Conference 09-13 September, Goiania, Brazil.
- Alzo'ubi A. K., Martin C. D., Cruden D. M., 2010. Influence of tensile strength on toppling failure in centrifuge tests, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 47 (6): 974–982.
- Bahaaddini M., Sharrock G., Hebblewhite B.K. , 2013. Numerical direct shear tests to model the shear behaviour of rock joints, Computers ve Geotechnics 51: 101–115.
- Bahaaddini M., Hagan P. C., Mitra R., Khosravi M. H., 2016. Experimental and numerical study of asperity degradation in the direct shear test, Engineering Geology 204: 41–52.
- Bahrani N., Potyondy D., Pierce M., 2012. Simulation of Brazilian Test using PFC2D Grain-Based Model, Proceedings of 21st Canadian Rock Mechanic Conference.
- Bahrani N., Kaiser P., Valley B., 2014. Distinct element method simulation of an analogue for a highly interlocked, non-persistently jointed rockmass, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 71: 117–130.
- Bidgoli M. N., Zhao Z., Jing L., 2013. Numerical evaluation of strength ve deformability of fractured rocks, Journal of Rock Mechanics ve Geotechnical Engineering 5: 419–430.
- Bidgoli M. N., Jing L., 2014. Anisotropy of strength ve deformability of fractured rocks, Journal of Rock Mechanics ve Geotechnical Engineering, 6: 156-164.
- Brideau M., Stead D., 2010. Controls on Block Toppling Using a Three-Dimensional Distinct Element Approach, Rock Mech Rock Eng, 43: 241–260.
- Burman B. C., 1971. A numerical approach to the mechanics of discontinua, PhD thesis, James Cook University of North Queensland, Townsville, Australia.
- Cai M., Kaiser P., 2006. Visualization of rock mass classification systems, Technical Note, Geotechnical & Geological Engineering 24 (4): 1089-1102.
- Cai Y.C., Wu J., Atluri S.N., 2013. A new implementation of the numerical manifold method (NMM) for the modeling of non-collinear ve intersecting cracks, CMES, 92 (1): 63-85.

- Camones L. A. M., Vargas Jr. E. D. A., Figueiredo R. P., Velloso R. Q., 2013. Application of the discrete element method for modeling of rock crack propagation ve coalescence in the step-path failure mechanism. *Engineering Geology*, 153: 80–94.
- Cao P., Liu T., Pu C., Lin H., 2014. Crack propagation and coalescence of brittle rock-like specimens with pre-existing cracks in compression, *Engineering Geology*, doi: 10.1016/j.enggeo.2014.12.010.
- Chiu C. C., Wang T. T., Weng M. C., Huang T. H., 2013. Modeling the anisotropic behavior of jointed rock mass using a modified smooth-joint model, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 62: 14–22.
- Cho N., Martin C. D., Segol D. C., 2007. A clumped particle model for rock, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 44: 997–1010.
- Cundall, P.A., 1971. A computer model for simulating progressive large-scale movements in block rock mechanics, *Proc. Symp. Int. Soc. Rock Mech. Nancy*, 2.
- Cundall P.A., Strack O.D.L., 1979a. A discrete numerical model for granular assemblies *Geotechnique*, 29 (1): 47–65.
- Cundall P. A., 1980. UDEC-a generalized distinct element program for modelling jointed rock. Rept PCAR-I-80, Peter Cundall Associates Report, European Research Office, U.S. Army, Contract DAJA37-79-C-0548.
- Cundall P. A., 1988. Formulation of a tree dimensional distinct element model-Part I. A scheme to detect ve represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abs.* 25 (3): 107-116.
- Cundall P. A., Hart R. D., 1992. Numerical modelling of discontinua. *Engineering Computations*, 9 (2): 101 - 113.
- Cundall P. A., Strack O. D. L., 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 29 (1): 47 –65.
- Debecker B., Vervoort A., 2013. Two-dimensional discrete element simulations of the fracture behaviour of slate. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 61: 161–170.
- Ding X. Zhang L., 2014. A new contact model to improve the simulated ratio of unconfined compressive strength to tensile strength in bonded particle models, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 69: 111–119.
- Duriez J. Scholtes L., Donze F., Micromechanics of wing crack propagation for different flaw properties, *Engineering Fracture Mechanics*, 153: 378–398.

- Eberhardt E., Stead D., Coggan J.S., Willenberg H., 2003. Hybrid finite-/discrete-element modelling of progressive failure in massive rock slopes, *TECHNOLOGY ISRM 2003–Technology roadmap for rock mechanics*, 275-280.
- Einstein H. H., Veneziano D., Baecher G. B., O'reilly K. J., 1983. The Effect of Discontinuity Persistence on Rock Slope Stability, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 20 (5): 227-236.
- Elmo D., 2006. Evaluation of a hybrid FEM/DEM approach for determination of rock mass strength using a combination of discontinuity mapping ve fracture mechanics modelling, with particular emphasis on modelling of jointed pillars. Phd thesis, the University of Exeter, 262.
- Esmaili K., Hadjigeorgiou J., Grenon M., 2010. Estimating geometrical ve mechanical REV based on synthetic rock mass models at Brunswick Mine. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 47: 915–926.
- Esmaili K., Hadjigeorgiou J., Grenon M., 2015. Capturing the complete stress–strain behaviour of jointed rock using a numerical approach, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 2015, DOI: 10.1002/nag.2346.
- García P., Rodolfo R., 2015. Analisis numerico del mecanismo de falla en macizos rocosos fracturados considerando el efecto escala. XIX Congreso nacional de ingenieria civil 2015- Huaraz.
- Galera Fernández J. M., Velasco P., 2002. Análisis de estabilidad de taludes, Comparativa entre los métodos de equilibrio límite y los análisis tensodeformacionales. En: *Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente*, ISSN 1136-4785, N°. 105: 16-22.
- Ghazvinian A. Sarfarazi V., Schubert W., Blumel M., 2012. A Study of the Failure Mechanism of Planar Non-Persistent Open Joints Using PFC2D, *Rock Mech Rock Eng*, 45: 677–693.
- Goodman R.E., Bray J.W., 1976. Toppling of Rock Slopes. *Proc. Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes*. Boulder, Colorado, ASCE, 2: 201-234.
- Hadjigeorgiou J., Esmaili K., Grenon M., 2009. Stability analysis of vertical excavations in hard rock by integrating a fracture system into a PFC model, *Tunnelling ve Underground Space Technology*, 24: 296–308.
- Hammah R.E., Yacoub T., Corkum B., Wibowo F., 2007. Analysis of Blocky Rock Slopes with Finite Element Shear Strength Reduction Analysis. *Proceedings of the 1st*

- Canada-US Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada, 27–31 May 2007, DOI: 10.1201/NOE0415444019-c40, 329–334.
- Hammah R.E., Yacoub T., Corkum B., Curran C.H., 2008. The Practical Modelling of Discontinuous Rock Masses with Finite Element Analysis. In Proceedings of the 42nd U.S. Rock Mechanics Symposium – 2nd U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium, San Francisco, US.
- Hammah R. E., Yacoub T. E., Curran C. H., 2009. Probabilistic Slope Analysis with the Finite Element Method, the 43rd US Rock Mechanics Symposium and 4th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium, held in Asheville, NC June 28th – July 1.
- Hart R., Cundall P.A., Lemos J., 1988. Formulation of a three-dimensional distinct element model—Part II. Mechanical calculations for motion ve interaction of a system composed of many polyhedral blocks. *Int. J. Rock Mech. ve Min. Sci. & Geomech. Abs.*, 25 (3): 117-125.
- Hashemi S.S., Momeni A.A., Melkoumian N., 2014. Investigation of borehole stability in poorly cemented granular formations by discrete element method. *Journal of Petroleum Science ve Engineering* 113: 23–35.
- Hoek, E. and Bray, J.W., 1977. *Rock Slope Engineering*, 2nd edition, London, Institution of Mining and Metallurgy.
- Hoek, E. and Bray, J.W., 1981. *Rock Slope Engineering*, Revised 3rd edition, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 341 - 351.
- Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B., 2002. Hoek-Brown criterion – 2002 edition. *Proc. NARMS-TAC Conference*, Toronto, 1: 267-273.
- Hsieh Y. M., Li H. H., Huang T. H., Jeng F. S., 2008. Interpretations on how the macroscopic mechanical behavior of svestone affected by microscopic properties— Revealed by bonded-particle model, *Engineering Geology*, 99: 1–10.
- Huang D., Cen D., Ma G., Huang R., 2015. Step-path failure of rock slopes with intermittent joints, *Landslides*, 12: 911–926.
- Israelsson J. I., 1996. Short Descriptions of UDEC ve 3DEC. *Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Processes of Fraaured Media Developments in Geotechnical Engineering*, 79: 523-528.
- Itasca, 2015. Particle Flow Code - PFC Version 5.
- Ivars D. M., Potyondy D.O., Pierce M., Cundall P.A., 2008. The smooth-joint contact model. *Proceedings of the 8th World Congress on Computational Mechanics – 5th European Congress on Computation Mechanics and Applied Science and Engineering*. Venice, Italy.

- Ivars D. M., Pierce M. E., Darcel C., Reyes-Montes J., Potyondy D.O., Young R.P., Cundall P.A., 2011, The synthetic rock mass approach for jointed rock mass modelling, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 48: 219–244.
- Jeagar J. C., 1971. Friction of rocks and stability of rock slopes. *Geotechnique*, 21 (2): 97–134.
- Jennings J., 1970. A mathematical theory for the calculation of the stability of slopes in open cast mine, *Pit Mining Symposium, Planning Open Pit Mines*, Van Rensburg (Ed.), *Planning Open Pit Mines, Proceedings*, Johannesburg, A.A. Balkema, Cape Town, 87–102.
- Jiang M., Jiang T., Crosta G. B., Shi Z., Chen H. Zhang N., 2015. Modeling failure of jointed rock slope with two main joint sets using a novel DEM bond contact model, *Engineering Geology*, 193: 79–96.
- Jing L. 2003. A review of techniques, advances ve outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics ve rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40: 283–353.
- Jing L., Hudson L. A., 2002. Numerical methods in rock mechanics. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 39: 409–427.
- Kılıç R., 2005. *Kaya Mekaniği Ders Notları*, Ankara Üniversitesi, Döner Sermaye İşletme Yayınları, 39: 86.
- Kozicki J., Donze F.V., 2008. A new open-source software developed for numerical simulations using discrete modeling methods. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 197: 4429–4443.
- Kulatilake P.H.S.W., Malama B., Wang J., 2001. Physical ve particle flow modeling of jointed rock block behavior under uniaxial loading, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 38: 641–657.
- Lambert C., Coll C., 2014. Discrete modeling of rock joints with a smooth-joint contact model, *Journal of Rock Mechanics ve Geotechnical Engineering*, 6: 1–12.
- Lei H., 2011. *Three Dimensional Numerical Manifold Method ve Rock Engineering Applications*, Phd thesis, Nanyang Technological University, 52.
- Lemos J. V., 2007. Discrete Element Modeling of Masonry Structures, *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, ve Restoration*, 1 (2): DOI:10.1080/15583050601176868.
- Li L. C., Tang C. A., Zhu W. C., Liang Z. Z., 2009. Numerical analysis of slope stability based on the gravity increase method, *Computers and Geotechnics* 36: 1246–1258.

- Lisjak A., Grasselli G., 2014. A review of discrete modeling techniques for fracturing processes in discontinuous rock masses, *Journal of Rock Mechanics ve Geotechnical Engineering*, 1-14.
- Liu Z., Koyi H. A., 2013. The impact of a weak horizon on kinematics ve internal deformation of a failure mass using discrete element method. *Tectonophysics* 586: 95–111.
- Liu J., Wang P., Liu J., 2015, Macro- and micro-mechanical characteristics of crushed rock aggregate subjected to direct shearing, *Transportation Geotechnics*, 2: 10–19.
- Liu T., Lin B., Zou Q., Zhu C., Yan F., 2016. Mechanical behaviors and failure processes of precracked specimens under uniaxial compression: A perspective from microscopic displacement patterns, *Tectonophysics*, 672–673: 104–120.
- Lorig L., Varona P., 2001. Análisis de la Estabilidad de Taludes Mineros Mediante Diferencias Finitas, V Simposio Nacional sobre Taludes - Laderas Inestables, Madrid, 2: 677-688.
- Lu C. Y., Tang C. L., Chanb Y. C., Hu J. C., Chi C. C., 2014. Forecasting lveslide hazard by the 3D discrete element method: A case study of the unstable slope in the Lushan hot spring district, central Taiwan. *Engineering Geology*, 183: 14–30.
- Marinos P., Hoek E., 2000. GSI – A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. *Proc. GeoEng2000 Conference, Melbourne*, 1422-1442.
- Muller J. R., Martel S. J., 2000. Numerical Models of Translational Landslide Rupture Surface Growth, *Pure appl. geophys*, 157: 1009–1038.
- Müller L., 1968. New considerations on the Vaiont slide, *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 6: 1-91.
- O'Sullivan C., 2011. Particle-Based Discrete Element Modeling: Geomechanics Perspective, *Int. J. Geomech.*, DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000024: 449-464.
- Pain A., Kanungo D.P., Sarkar S., 2014, Rock slope stability assessment using finite element based modelling – examples from the Indian Himalayas, *Geomechanics ve Geoengineering: An International Journal*, doi 10.1080/17486025.2014.883465.
- Park J.W., Song J.J., 2009. Numerical simulation of a direct shear test on a rock joint using a bonded-particle model, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 46: 1315–1328.
- Potyondy D. O., Cundal P. A., 2004. A bonded-particle model for rock, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41: 1329–1364.

- Potyondy D. O., 2012. A Flat-Jointed Bonded-Particle Material for Hard Rock, 46th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium held in Chicago, IL, USA, 24-27 June.
- Potyondy D. O., 2014. Material-Modeling Support in PFC, Memorandum, Itasca, 92.
- Potyondy D. O., 2015. The bonded-particle model as a tool for rock mechanics research and application: current trends and future directions, review paper, *Geosystem Engineering*, 18 (1): 1–28.
- Poulsen B. A., Adhikary D. P., 2013. A numerical study of the scale effect in coal strength, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 63: 62–71.
- Pritchard M. A., Savigny K. W., 1990. Numerical modeling of toppling, *Can. Geotech. J.*, 27: 823-834.
- Prudencio M. Van Sint Jan M., 2007. Strength and failure modes of rock mass models with non-persistent joints, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 44: 890–902.
- Rockfield, 1986. ELFEN, <http://www.rockfield.co.uk/software>.
- Rocklab, 2011. Rockscience, <http://roclab.software.informer.com/1.0/>.
- Scholtes L., Donze F., 2012. Modelling progressive failure in fractured rock masses using a 3D discrete element method, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 52: 18–30.
- Scholtes L., Donze F., 2015. A DEM analysis of step-path failure in jointed rock slopes, *Comptes Rendus Mécanique*, 343 (2): 155–165.
- Shi G.H., 1988. Discontinuous deformation analysis: A new numerical model for the statics ve dynamics of block systems. Phd thesis, University of California, Berkeley.
- Shi G. H., 1991. Manifold method of material analysis, *Trans 9th Army Conf on Applied Mathematics and Computing*, Minneapolis: Minnesota, 57–76.
- Sheorey P. R., 1997. Empirical rock failure criteria. A. A. Balkema, Rotterdam, Doi: ISBN9054106700.
- Sierra V. B., Scholtes L., Donze F., Elmouttie M., 2015. DEM analysis of rock bridges and the contribution to rock slope stability in the case of translational sliding failures, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 80 (2015) 67–78.
- Šmilauer V., 2010. Yade: past, present, future. In *Internal seminary in Laboratoire 3S-R*, Grenoble.
- Stead D., Eberhardt E., Coggan J. S., 2006. Developments in the characterization of complex rock slope deformation and failure using numerical modelling techniques, *Engineering Geology*, 83: 217– 235.

- Sternik K., 2013. Comparison of slope stability predictions by gravity increase and shear strength reduction methods, Technical Transactions. Environment Engineering Czasopismo Techniczne, Środowisko, 121-130.
- Ulusay R., Sönmez H., 2007. Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri, JMO yayını 60: 292.
- Wang C., Tannanta D.D., Lilly P.A., 2003. Numerical analysis of the stability of heavily jointed rock slopes using PFC2D. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 40: 415–424.
- Wong L. N. Y., Einstein H. H., 2009. Crack Coalescence in Molded Gypsum and Carrara Marble: Part 1. Macroscopic Observations and Interpretation, Rock Mechanics and Rock Engineering, 42 (3): 475-511.
- Wong L. N. Y., Wu Z., 2014. Application of the numerical manifold method to model progressive failure in rock slopes. Engineering Fracture Mechanics, 119: 1–20.
- Wu Z., Wong L. N. Y., 2013. Modeling cracking behavior of rock mass containing inclusions using the enriched numerical manifold method. Engineering Geology, 162: 1–13.
- Yang Z. Y., Chen J. M., Huang T. H., 1998. Effect of joint sets on the strength and deformation of rock mass models, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 35 (1): 75–84.
- Yang S. Q., Huang Y. H., 2014. Particle flow study on strength ve meso-mechanism of Brazilian splitting test for jointed rock mass. Acta Mechanica Silica, Doi: 10.1007/s10409-014-0076-z.
- Yang S. Q., Huang Y. H., Jing H. W., Liu X. R., 2014. Discrete element modeling on fracture coalescence behavior of red sandstone containing two unparallel fissures under uniaxial compression, Engineering Geology, 178: 28–48.
- Zhang J. H., Chen Z. Y., Wang X. G., 2007. Centrifuge Modeling of Rock Slopes Susceptible to Block Toppling, Rock Mech. Rock Eng., 40 (4): 363–382.
- Zhang X. P., Wong L. N. Y., 2013. Crack initiation, propagation and coalescence in rock-like material containing two flaws: a numerical study based on bonded-particle model approach, Rock Mech. Rock Eng., 46 (5): 1001–1021.
- Zhang G., Zhao Y., Peng X., 2010. Simulation of toppling failure of rock slope by numerical manifold method, International Journal of Computational Methods, 07 (01).

- Zhang Q., Zhu H., Zhang L., Ding X., 2011. Study of scale effect on intact rock strength using particle flow modeling, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 48: 1320–1328.
- Zhang Y., Stead D., Elmo D., 2015. Characterization of strength ve damage of hard rock pillars using a synthetic rock mass method, *Computers ve Geotechnics*, 65: 56–72.
- Zheng H., Liu H., Ge X., 2013. Numerical manifold space of Hermitian form ve application to Kirchhoff's thin plate problems, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 95 (9): 721–739.
- Zhu H.P., Zhou Z.Y., Yang R.Y., Yu A. B., 2007. Discrete particle simulation of particulate systems: Theoretical developments, *Chemical Engineering Science* 62: 3378–3396.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Şaziye Özge DİNÇ

Doğum Yeri: Ankara

Doğum Tarihi: 03.04.1984

EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi: Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans Öğrenimi: Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Bildiği Yabancı Diller: İngilizce

BİLİMSEL FAALİYETLERİ

a) Yayınlar -SCI kapsamındaki dergilerde yayınlanan makaleler

Dinc S.O., Işık N. S., 2016, Numerical investigation of planar failure mechanisms of weak rock slopes, Geotechnique Letters, will be resubmitted.

Dinc S.O., Işık N.S., 2016, Investigation of toppling failure mechanisms of weak rock masses, Computers and Geotechnics, resubmitted.

Dinc O.S., Sonmez H., Tunusluoglu C., Kasapoglu K.E., 2011, A new general empirical approach for the prediction of rock mass strengths of soft to hard rock masses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 48, Issue 4, June 2011, Pages 650– 665.

b) Bildiriler -Uluslararası -Ulusal

Uluslararası Bildiriler

Dinc S. O., Scholtes L. Investigation of failure processes in transversely isotropic rocks through DEM modelling, Workshop GeoMec - Nantes, France - 2017.

Dinc S. O., Karaca Z., Isik N. S. The effects of strength parameters on slope failure mechanisms in weak rocks, EUROCK Cappadocia - 2016.

Dinc S. O., Isik N. S., Karaca Z. The distinct element analysis of toppling failure mechanisms, EGU Vienna - 2016

Dinc S. O., Isik N. S., Karaca Z. An investigation of planar failure mechanisms of rock slope using distinct element method, EGU Vienna - 2015.

Dinc S. O. and Tunusluoglu M.C. An investigation of possible stability problems of rock masses during Elmadag tunnel excavation, Turkey, EGU Vienna - 2014.

Dinc S. O. and Tunusluoglu M.C. Possible mechanical behavior of Elmadag and Artova Formations during tunnel excavation, EUROCK Vigo - 2014.

Dinc OS, Sonmez H, Tunusluoglu C, Kasapoglu KE, Coskun A,. A New Empirical Approach For Prediction of Rock Mass Strength Based on a Strength Reducing Curve Zone instead of Unique Strength Reducing Curve, 6th Asian Rock Mechanics Symposium- EUROCK New Delhi - 2010.

Coskun A., Sonmez H., Kasapoglu K.E., Dinc S.O., Tunusluoglu M.C., 2010. Determination of Uniaxial Compressive Strength of Ankara Agglomerate Considering Fractal Geometry of Blocks, EGU Vienna - 2010.

Ulusal Bildiriler

Dinç Ş. Ö. ve Tunusluoğlu M.C. Elmadağ Formasyonu ve Artova Ofiyolitli Karışığında inşa edilecek bir demiryolu tüneline meydana gelebilecek deformasyonların araştırılması, 67. TJK Ankara - 2014.

Tunusluoğlu M. C., Dinç Ş. Ö., Çalık A., Karaca Ö., Kestanbol Granitlerinin Bozunma Derecesinin Değerlendirilmesi, 65. TJK Ankara - 2012.

Tunusluoğlu M. C., İskenderkaptanoğlu P., Dinç Ş. Ö., Safa M.T., Bir toprak dolgu barajın (Türkiye'nin kuzeybatısı) dolu savağındaki duraysızlık mekanizmasının değerlendirilmesi, 64. TJK Ankara - 2011

Dinc O.S., Sonmez H., Kasapoglu K.E., Coskun A., Tunusluoglu M.C., 2010. Kaya Kütlelerinin Dayanımının Belirlenmesi için Eğrisel İndirgeme Zonunu Dikkate Alan Yeni Bir Ampirik Yaklaşım, 63. TJK Ankara - 2010.

c) Katıldığı Projeler

1. Discrete modeling of deformation and failure processes in transversely isotropic rocks (Lorraine Üniversitesi ve ANDRA, 2016-2017)
2. Kaya şevlerindeki yenilme mekanizmalarının nümerik analizlerle incelenmesi (TÜBİTAK, 2014-2015).
3. Çanakkale İli İçin İmar Planına Esas Jeolojik - Jeoteknik Zemin Etüdü (Döner Sermaye, Çanakkale Belediyesi, 2012-2013).
4. Bir Bozunma Sınıflama Sistemi Temel Alınarak Kestanbol Granitlerinin Bozunmasının Değerlendirilmesi (ÇOMÜ, BAP, 2010-2011).

5. Eklemlı Kaya Kütıleleri ve Bimrocklar İçin Birleştirilmiş Jeomekanik Sınıflama Sisteminin ve Genelleştirilmiş Bir Ampirik Yaklaşımın Geliştirilmesi (TÜBİTAK, 2008-2010).

İŐ DENEYİMİ

Çalıştığı Kurumlar ve Yıl:

Afrasia Maden Enerji Mad. ve dan. tic. A.S., 2008-2009 (Geologist)

İLETİŐİM

E-posta Adresi: osgedc@gmail.com

