

Çift Düzlemsel Yenilme Mekanizmalarının Limit Denge ve Sayısal Analiz Yöntemleri Kullanılarak Karşılaştırılması

Yalın Umur DOĞAN^{*1}, Nihat Sinan IŞIK²

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Öğrencisi

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Anahtar Kelimeler:

Şev stabilitesi
Çift düzlemsel
yenilme
Sayısal analiz
Limit denge

Özet

Eğim şevlerinde gözlenen yenilme mekanizmaların geleneksel kinematik analiz yöntemleri ile değerlendirilmesi mümkün olmamakta, bu nedenle, söz konusu yenilme mekanizmalarının gelişmiş şev duraylılığı analiz yöntemleri ile değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, tamamen ve kısmi süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizmasının limit denge, sonlu elemanlar ve ayırık elemanlar yöntemleri kullanılarak incelenmesi ve sonuçların karşılaştırılması amaçlanmıştır. Şev ile aynı eğime sahip kireçtaşı tabakalar içeren bir eğim şevinde şev duraylılığı analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre, çift düzlemsel yenilme mekanizması analizlerinde limit denge esaslı yöntem sonlu elemanlar ve ayırık elemanlar esaslı yöntemlere kıyasla daha tutucu sonuçlar vermektedir.

Comparison of Bi-Planar Failure Mechanisms Using Limit Equilibrium and Numerical Analysis Methods

Keywords:

Slope Stability
Bi-planar failure
Numerical analysis
Limit equilibrium

Abstract

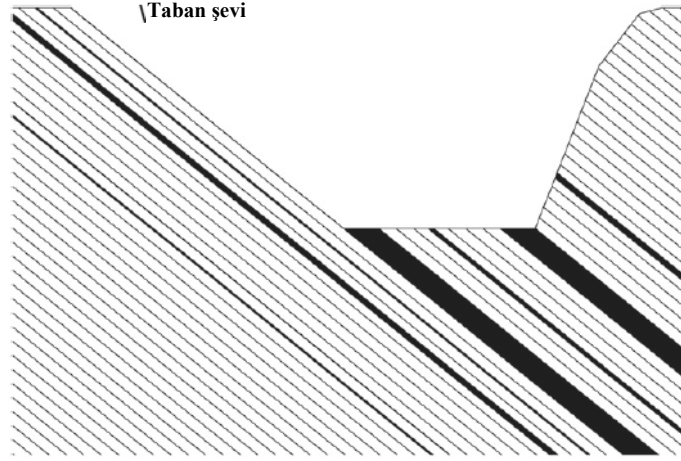
Failure mechanisms observed in dip slopes are unlikely to be evaluated using conventional kinematic analysis methods, hence, they require to be evaluated using advanced slope stability analysis methods. In this study, it was aimed to evaluate the fully and partially discontinuity controlled bi-planar failure mechanisms using limit equilibrium, finite element, and discrete elements methods and to compare the results obtained. Slope stability analyses are conducted on a dip slope which is composed of limestone strata having the same dip angle as the slope. According to the analyses results, it is obtained that the limit equilibrium based slope stability analysis method estimates a more conservative factor of safety on bi-planar failure mechanisms compared to finite elements and discrete elements methods.

1. GİRİŞ

Eğim şevleri literatürde şev eğimi ile aynı veya yaklaşık aynı eğime sahip, yüksek devamlılıklı süreksizler içeren şevler olarak tanımlanmıştır. Yaygın olarak sedimanter birimlerle ilişkili olan açık ocak kömür madenlerinde Şekil 1'de gösterildiği gibi sedimanter birimlerin tabaka eğimleri ile paralel eğimli taban şevleri oluşmaktadır [1]. Kaya birimlerinden oluşan ve eğim şevleri gibi detaylı ve hassas duraylılık analizleri yapılması gereken şevler için literatürde klasik olarak düzlemsel kayma, kama tipi kayma ve devrilme tipi olmak üzere 3 tip kinematik analiz yöntemi önerilmiştir. Ancak eğim şevlerinde süreksizlik eğimi ile şev eğiminin paralel veya yaklaşık paralel olması nedeniyle süreksizlik şev yüzeyinde günlenmez, bu nedenle eğim şevlerinin geleneksel kinematik analiz yöntemleri ile değerlendirilmesi olanaksız hale gelir [2]. Fakat, eğim şevlerinde gerçekleşmiş olan yenilmelerin incelendiği vaka çalışmaları yenilmeye neden olan farklı mekanizmaların varlığını ortaya koymuştur [3-6].

Alejano ve diğerlerinin [7] bir taş ocağındaki iki farklı şev üzerinde yapmış olduğu araştırma ve Calder ve diğerlerinin [8] metal madenciliği yapılan Brenda Madeni'nde yaptırmış oldukları kompleks yenilme

mekanizması, eğim şevlerinde gerçekleşen bu farklı yenilme mekanizmalarının sadece kömür madenleri ile ilişkilendirilemeyeceğini, şev ile paralel eğimli fay, zayıflık zonu veya süreksizlik seti gibi şev duraylılığını etkileyebilecek yapısal elemanlar içeren farklı maden veya mühendislik şevlerinde de söz konusu bu farklı yenilme mekanizmalarının görülebileceğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, Watters ve diğerleri [9] ile Watters ve diğerlerinin [10] buzul yükünün zamanla kalkması ve eksfoliasyon süreci sonucunda oluşmuş ince granit katmanları içeren şevlerde yapmış oldukları incelemeler, eğim şevlerinde gözlenen bu yenilme mekanizmalarının yalnızca sedimanter birimler içeren eğim şevlerinde değil, metamorfik birimler içeren eğim şevlerinde de gerçekleşebileceğini ortaya çıkarmıştır.



Şekil 1. Açık ocak kömür madenlerinde gözlenen tipik taban şevi [1]

Geleneksel kinematik analiz yöntemleri ile değerlendirilmesi olanaksız olan bu yenilme mekanizmalarının dünya çapında son derece yaygın olarak kabul gören limit denge esaslı yöntemler ile değerlendirilmesi mümkündür. Bununla birlikte, Stead ve diğerlerinin [11] açık ocak kömür işletmelerinde gözlenen taban şevi yenilmelerini etkileyen faktörleri ve yenilme mekanizmalarını inceledikleri çalışmaları, söz konusu yenilme mekanizmalarının gelişmiş sayısal analiz yöntemleri ile de değerlendirilebileceğini ortaya koymuştur. Bilgisayar sistemlerindeki ileri teknolojiler ve son derece gelişmiş mühendislik yazılımları sayesinde bu mekanizmalar daha iyi anlaşılabilen, tasarım amaçlı güvenlik katsayılarının hesaplanabilmesi için sayısal analiz yöntemlerinin kullanılabilirliği mümkün olmaktadır. Geleneksel limit denge esaslı yöntemin yanı sıra, RS2 [12] gibi sonlu elemanlar yöntemi esaslı yazılımlar veya UDEC [13] gibi ayırık elemanlar yöntemi esaslı yazılımlar kullanılarak yenilme mekanizmalarının sayısal analizleri yapılabilmektedir. Bahsi geçen sonlu elemanlar veya ayırık elemanlar bazlı yöntemler ile sayısal şev duraylılığı analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için makaslama mukavemeti azaltımı (SSR) yöntemi [14] adı verilen özel bir teknikten faydalanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, tamamen ve kısmi süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizması limit denge, sonlu elemanlar ve ayırık elemanlar yöntemleri kullanılarak incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

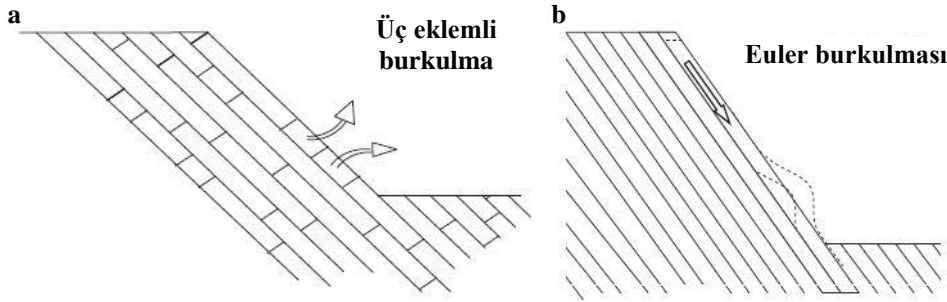
2. YENİLME MEKANİZMALARI

Eğim şevleri üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda literatürde üç farklı tip yenilme mekanizması tanımlanmıştır; i) burkulma (buckling), ii) kazıma (ploughing) ve iii) çift düzlemsel (bi-planar). Bununla birlikte, şevin ana süreksizlik veya eklem takımı dışında duraysızlığa neden olabilecek ikinci bir süreksizlik içerip içermemesine bağlı olarak bu üç farklı mekanizma kendi içerisinde; i) tamamen süreksizlik kontrollü veya ii) kısmi süreksizlik kontrollü olmak üzere iki alt başlık altında incelenmektedir. Şevin duraysızlığa neden olabilecek ikinci bir süreksizlik içermesi durumunda yenilecek kütle yalnızca süreksizlikler üzerinde hareket edecek ve yenilme tamamen süreksizlikler kontrollü gerçekleşecektir. Şevin duraysızlığa neden olabilecek ikinci bir süreksizlik içermemesi durumunda ise yenilme mekanizmasında süreksizlik kontrollü kısmi olacak, bu nedenle yenilme şev topuğundaki kaya kütlesi içerisindeki makaslama ve/veya parçalanma sonucu gerçekleşecektir.

2.1. Burkulma (Buckling)

Burkulma tipi yenilme iki ayrı faz şeklinde gerçekleşmektedir. Buna göre burkulma tipi yenilme mekanizması, ince ve uzun bir kaya tabakasının öncelikle yüksek gerilmeler altında elastik deformasyona uğrayarak eğilmesi, ardından ise kırılarak yenilmesi şeklinde oluşmaktadır. Şev eğimi ile paralel süreksizlik veya süreksizlik seti haricinde süreksizlik içeren tamamen süreksizlik kontrollü burkulma tipi yenilme “üç eklemli burkulma”,

yalnızca şev eğimi ile paralel süreksizlik içeren kısmi süreksizlik kontrollü burkulma yenilmesi ise “Euler burkulması” olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2).

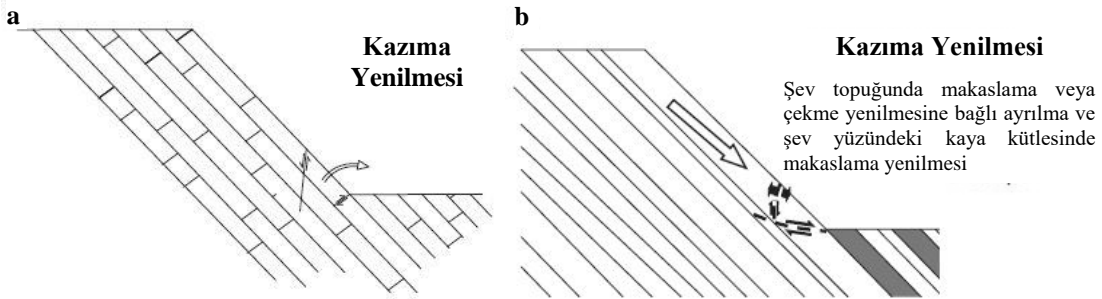


Şekil 2. a) Üç eklemli burkulma, b) Euler burkulması [15]

Şev yüzeyinde günlenen, tabakalanmaya dik en az üç süreksizlik içeren şevlerde gözlenen burkulma yenilmesi Cavers [16] tarafından üç eklemli burkulma yenilmesi olarak tanımlanmıştır. Üç eklemli burkulma yenilmesi mekanizmasında yenilme genellikle ana süreksizlikler içerisinde dönme hareketini tetikleyecek su basıncının oluşması gerçekleşmektedir. Euler burkulma yenilmesi ise genellikle tek bir tabakada gözlenmesine rağmen, Chen ve diğerleri [17] bu tip yenilme mekanizmasının birden fazla tabakada da gerçekleşebileceğinin dikkate alınması gerektiğini belirtmiştir.

2.2. Kazıma (Ploughing)

Kazıma tipi yenilme mekanizmasını üç eklemli burkulma yenilmesi mekanizmasından ayıran temel fark şevi dik olarak kesen süreksizliğin 90 dereceden büyük açıda eğimli olmasıdır. Kazıma tipi yenilme mekanizması, şev yüzeyini kesen eğimli süreksizliğin üzerinde yer alan kaya tabakasının oluşturmuş olduğu aktif kuvvetlerin, söz konusu süreksizliğin altında bulunan blok ile süreksizliğin arasındaki makaslama dayanımını aştığı durumda süreksizliğin altında yer alan bloğun şev yüzeyinin dışına doğru hareket etmesi ve üstte yer alan bloğun altta yer alan bloğun altına doğru hareketi şeklinde gerçekleşmektedir (Şekil 3).

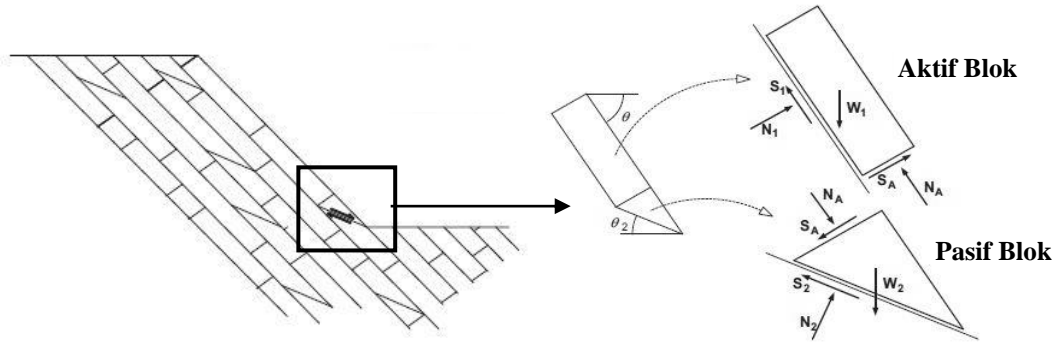


Şekil 3. a) Tamamen süreksizlik kontrollü kazıma yenilmesi, b) Kısmi süreksizlik kontrollü kazıma yenilmesi [15]

Dawson ve diğerleri [5] farklı kömür ocağı işletmelerinde gerçekleştirmiş oldukları çalışmalar neticesinde kazıma tipi yenilmelerin kalınlığı 5 metreyi aşmayan kaya tabakalarında ve şev yüksekliğinin üstten %40-%60'lık bölümlerinde oluşacağını önermiştir. Stead ve diğerleri [11] ise maden ocağının taban zemini ile örtü yükü tarafından oluşturulacak çevre gerilmeleri nedeniyle alt bloğun yerine kenetleneceğini, bu sebeple kazıma tipi yenilme mekanizmasının şev topuğunda meydana gelmesinin olanaksız olduğunu belirtmiştir.

2.3. Çift Düzlemsel (Bi-Planar)

Aktif ve pasif blok olmak üzere iki bloktan oluşan çift düzlemsel yenilme mekanizması bu nedenle literatürde aktif-pasif şev yenilmesi olarak da adlandırılmaktadır (Şekil 4). Çift düzlemsel yenilme mekanizması aktif bloğun şev aşağı hareketi sebebiyle pasif blok üzerinde bir yük oluşturması, oluşan bu yük nedeniyle pasif bloğun duraylılığını yitirmesi ve yenilmenin meydana gelmesi şeklinde gerçekleşmektedir.

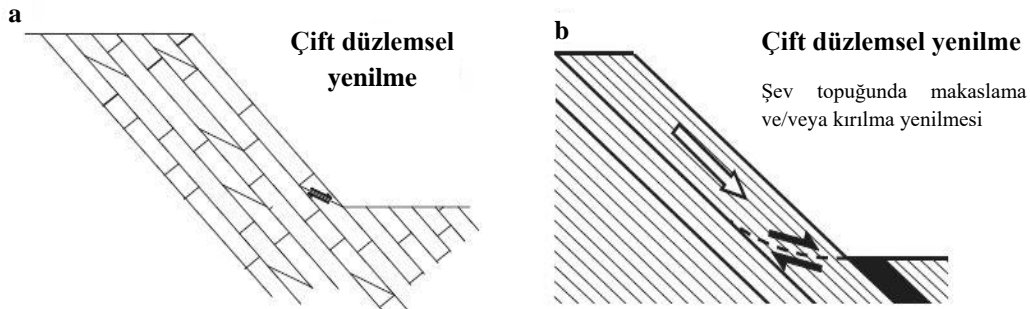


Şekil 4. Tipik çift düzlemsel şev yenilme mekanizması [15]

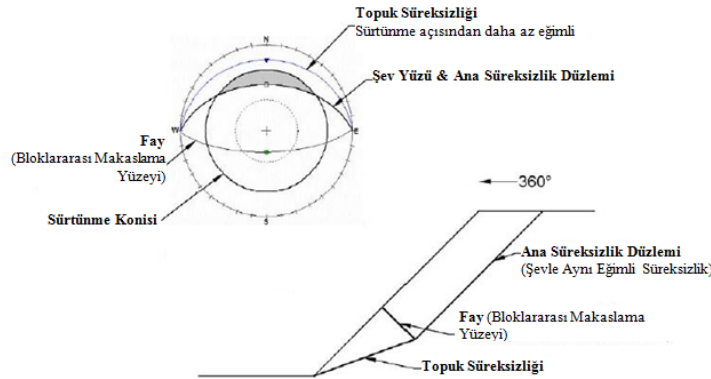
Literatürde tanımlanmış olan çift düzlemsel yenilme vakaları uyarınca mekanizma pasif blokta gerçekleşecek topuk yenilme türüne bağlı olarak iki farklı tipte incelenmektedir. Şevin topuk kısmında şev eğiminden daha düşük eğime sahip ve şev yüzeyinde günlenen bir süreksizlik bulunması halinde pasif blok söz konusu bu süreksizlik üzerinde hareket edecektir. Bu durumda tamamen süreksizlik kontrollü bir çift düzlemsel yenilme mekanizması ortaya çıkacak ve yenilme görece hızlı bir şekilde gerçekleşecektir (Şekil 5a). Tamamen süreksizlik kontrollü bir çift düzlemsel yenilme mekanizmasının gerçekleşebilmesi için Nathanael [18]'in önermiş olduğu şu üç koşulun gerçekleşmesi gerekmektedir (Şekil 6);

- 1) Aktif bloğun alt kenarı, pasif kamanın alt kenarından daha dik eğime sahip olmalıdır.
- 2) Pasif bloğun alt kenarında bulunan süreksizlik şev yüzeyinde günlenmeli, ancak günlenen bu süreksizlik eğim açısı süreksizliğin sürtünme açısından daha düşük olmalıdır.
- 3) Aktif ve pasif bloğu ayıran düzlemsel bir yapısal eleman olmalıdır.

Öte yandan, şev topuğunda herhangi bir süreksizlik bulunmadığı durumda yenilme mekanizması aktif bloğun oluşturacağı yükler nedeniyle şev topuğundaki kaya kütlesi içerisinde makaslama ve/veya kırılma şeklinde gerçekleşecektir (Şekil 5b). Kısmi süreksizlik kontrollü bir yenilme mekanizmasının ortaya çıkacağı bu tip yenilme şev topuğunda yer alan kaya kütlelerinin makaslama dayanımı ile doğrudan ilişkilidir. Kısmi süreksizlik kontrollü yenilme mekanizması görece daha yavaş bir şekilde meydana gelmektedir.

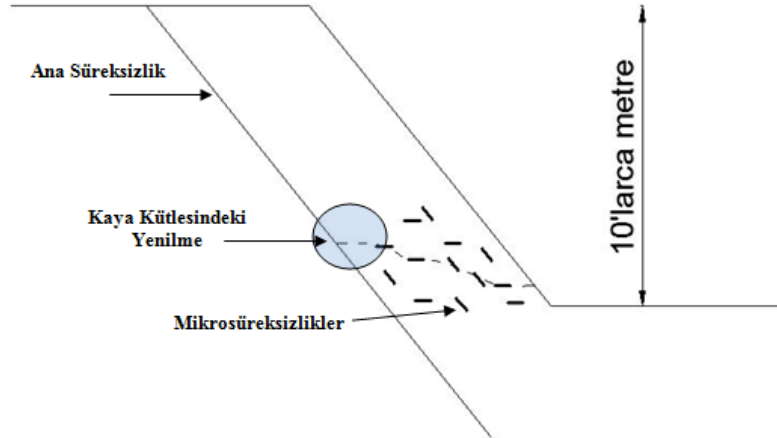


Şekil 5. a) Tamamen süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme, b) Kısmi süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme [15]



Şekil 6. Nathanael [18]'e göre kinematik çift düzlemsel yenilme analizi

Eberhardt ve diğerleri [19] pasif bloğun altında yer alan düşük eğimli süreksizliğin tabakalar ile 15°'den daha eğimli açı yapması durumunda, aktif ve pasif blok arasında oluşacak çekme yenilmesi ve deformasyonun kaymanın kinematik olarak gerçekleşmesine olanak sağlayacağını belirtmiştir. Goodman ve Kieffer [20] ise kısmi süreksizlik kontrollü yenilme mekanizmasında gözlenen şev topuğundaki kaya kütlesi yenilmelerinin, sağlam kaya içerisinde yer alan mikrosüreksizlikler ve kaya köprüleri boyunca kırılma ve parçalanma biçiminde aşamalı olarak gerçekleşerek kopma yüzeyinin şev yüzeyinde günlendiği durumda meydana gelebileceğini önermiştir. Hoek ve diğerleri [21] de eğim şevlerinin topuğunda gerçekleşecek makaslama ve/veya parçalanma yenilmeleri için benzer bir mekanizmayı tanımlamışlardır (Şekil 7).



Şekil 7. Goodman ve Kieffer [20] ve Hoek ve diğerleri [21] tarafından tanımlanan aşamalı topuk yenilmesi

3. MATERYAL VE METOD

Bu çalışma kapsamında bir adet tamamen süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizması ve bir adet kısmi süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizması limit denge yöntemi ve sayısal analiz yöntemleri kullanılarak analiz edilmiş, ilgili çift düzlemsel yenilme mekanizmaları için güvenlik katsayıları hesaplanmıştır. Analizlerde kullanılan şev geometrisi Alejano ve diğerlerinin [1] çalışmasından kısmen değiştirilerek alınmıştır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen limit denge yöntemi esaslı şev duraylılığı analizlerinde Rocscience firmasının 2 boyutlu limit denge esaslı şev duraylılığı analiz yazılımı Slide2 2018 [22]'den faydalanılmıştır. Gerçekleştirilen sayısal analizlerde ise yine Rocscience firmasının 2 boyutlu sonlu elemanlar yazılımı olan RS2 2019 [12] ve Itasca firmasının 2 boyutlu ayırık elemanlar yazılımı olan UDEC [13] yazılımları kullanılmıştır.

Sayısal analiz yöntemleri ile şev duraylılığı analizleri gerçekleştirilirken makaslama mukavemeti azaltımı (SSR) adı verilen özel bir tekniğin kullanılması gerekmektedir. Makaslama mukavemeti azaltımı yönteminde şevi oluşturan zemin ve kaya malzemeleri ile varsa süreksizlerin gerçek dayanım özellikleri (kohezyon, içsel sürtünme açısı, çekme gerilmesi vb.) belirli bir katsayı oranında düşürülerek sayısal analizler gerçekleştirilmektedir. Sayısal modelin çözümü sonuca yakınsar ise dayanım daha fazla düşürülerek model yeniden çözülür. Bu işlem çözümün sonuca yakınsamadığı yani şevin yenildiği ana kadar tekrarlanır. Şev duraysızlığının gerçekleştiği andaki dayanım azaltım katsayısı, analiz yapılan şev için güvenlik katsayısını ifade etmektedir.

3.1. Limit Denge Yöntemi

Limit denge esaslı yöntem küresel ölçekte kabul görmüş, kullanımı son derece yaygın olan, kuvvet ve moment eşitlikleri ilkelerine dayanan bir şev duraylılık analizi yöntemidir. Limit denge yönteminde kaymaya karşı kuvvetlerin kaydırıcı kuvvetlere oranı statik denge denklemleri kullanılarak hesaplanmakta ve bu oran güvenlik katsayısı olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemle gerçekleştirilen şev duraylılığı analizlerinde en yaygın olarak kullanılan yaklaşıma göre incelenen kütle düşey dilimlere bölünerek denge denklemleri her bir dilim için ayrı ayrı yazılmakta ve çözülmektedir. Tüm limit denge yöntemleri güvenlik katsayısı hesaplamak için; i) düşey yöndeki kuvvetlerin dengesi, ii) yatay yöndeki kuvvetlerin dengesi ve iii) herhangi bir noktadaki momentlerin dengesinden en az birini kullanmaktadır.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen limit denge esaslı analizlerde Morgenstern-Price [23], Spencer [24] ve Janbu [25]'nin önermiş olduğu limit denge yöntemleri kullanılmıştır.

3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yönteminde incelenen alan için model sınırları tanımlanarak ve geometri çok sayıda, birbirine düğüm noktaları ile bağlı, sonlu eleman adı verilen basit ve küçük alt bölgelere bölünerek karmaşık mühendislik problemlerinin çözüme ulaşması hedeflenmektedir. Sonlu elemanlar arasındaki gerilme ve deformasyon aktarımları kısmi diferansiyel denklemler yardımı ile çözümlenerek sonuca ulaşılmaktadır. Gelişmiş malzeme modelleri ve sınır koşulları tanımlanabilmesi nedeniyle sonlu elemanlar yöntemi, kompleks ve çok aşamalı mühendislik problemlerinin kolay ve hızlı bir şekilde analiz edilmesine olanak sağlamaktadır.

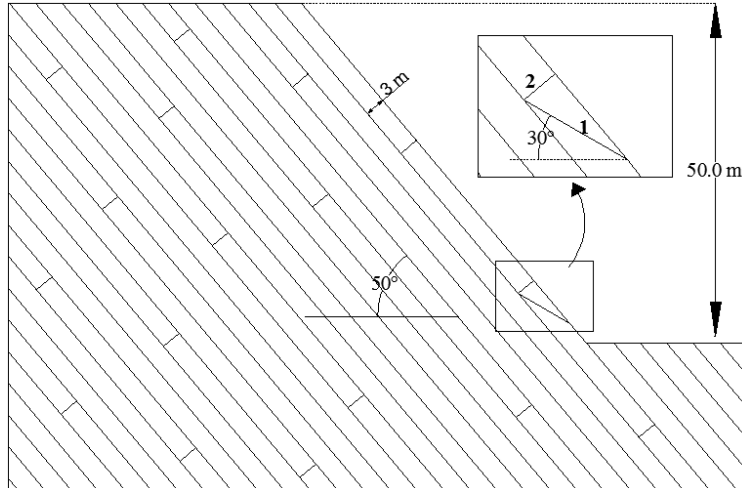
3.3. Ayrık Elemanlar Yöntemi

Ayrık elemanlar yöntemi, kaya kütleleri gibi süreksizlikler içeren ortamlarda malzeme davranışlarının analiz edilmesi için geliştirilmiş bir sayısal analiz yöntemidir. Ayrık elemanlar yönteminde incelenecek geometri birbirine bağlı olmayan bloklar bütününden oluşmaktadır. Süreksizlikler ise bloklar arasındaki sınır koşulları ile tanımlanmaktadır. Rijit veya deforme olabilir şekilde modellenebilen her bir blok farklı malzeme modelleri kullanılarak tanımlanabilmekte, süreksizlik yapıları için ise süreksizlik özellikleri tanımlanabilmektedir. Ayrık elemanlar yöntemi ile blokların dönel hareketi veya süreksizlikler boyunca yüksek mertebede deformasyon davranışlarının modellenmesi nedeniyle süreksizlikler içeren geometrilerde kompleks ve doğrusal olmayan davranış biçimlerinin modellenmesi mümkün olmaktadır.

Hem ayrık elemanlar yöntemini hem de sonlu elemanlar yöntemini limit denge yönteminden ayıran en temel fark ise söz konusu bu sayısal analiz yöntemlerinin limit denge yönteminin aksine dilimlere etkiyen kuvvetler veya kayma yüzeyleri ile ilgili herhangi bir varsayım yapmayı gerektirmemesi ve gerilme-birim deformasyon ilişkilerini dikkate almasıdır.

4. ÇİFT DÜZLEMSEL YENİLME MEKANİZMASI ANALİZLERİ

Bu çalışma kapsamında hem yenilmenin tamamen süreksizlikler boyunca gerçekleşeceği tamamen süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizması, hem de topukta makaslama yenilmesi nedeniyle duraysızlığın gerçekleştiği kısmi süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizması için şev duraylılığı analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı analiz yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen şev duraylılık analizleri neticesinde elde edilen sonuçlar birbiri ile karşılaştırılmıştır. Analizlerde 50 m yüksekliğinde, 3 m kalınlığında tabakalar içeren ve kireçtaşı biriminden oluşan bir eğim şevi kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan şevin temsili geometrisi Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 8. Çift düzlemsel yenilme analizlerinde kullanılan şevin temsili geometrisi

Çift düzlemsel yenilme mekanizması analizlerinde kullanılacak şevin ve şeve paralel tabakaların eğimi 50°'dir. Yenilmenin süreksizlikler boyunca gerçekleşeceği tamamen süreksizlik kontrollü yenilme mekanizması analizlerinde modellenecek şev topuğundaki daha düşük eğimli süreksizliğin eğimi ise 30°'dir. Kısmi süreksizlik kontrollü yenilme mekanizması analizlerinde ise Şekil 8'de verilmiş olan 1 ve 2 numaralı süreksizlikler modellenmeyecek, yenilme topukta yer alan kaya kütlesi içerisindeki makaslama veya parçalanma yenilmesi nedeniyle gerçekleşecektir. Analizlerde kullanılan kireçtaşı birimlerinin rijitlik ve dayanım parametreleri Tablo 1'de, süreksizliklerin mekanik özellikleri ile dayanım parametreleri ise Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 1. Kireçtaşı birimlerinin dayanım ve rijitlik parametreleri

Birim	c (kPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	Young Modülü (MPa)	Poisson Oranı
Kireçtaşı	75	32	25	50	0.32

Tablo 2. Süreksizliklerin mekanik ve dayanım özellikleri

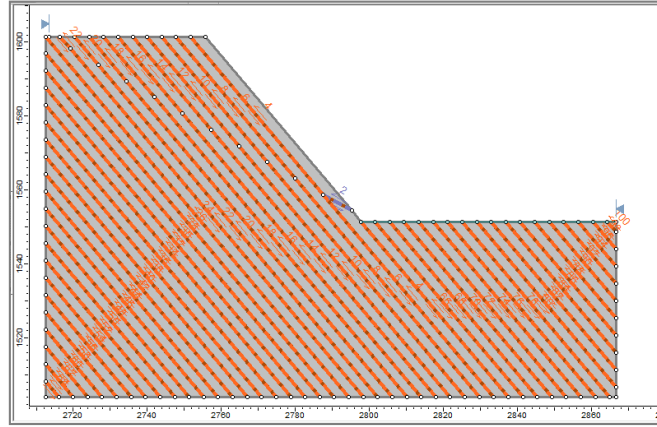
Süreksizlik	Eğim (°)	c (kPa)	ϕ (°)	Jn* (GPa/m)	Js** (GPa/m)
Tabaka	50	0	30	10	1
Eklem 1	30	0	40	10	1
Eklem 2	<i>Tabakaya Dik</i>	0	40	10	1

*Süreksizlik yüzeyindeki normal gerilmeye bağlı süreksizlik normal rijitliği

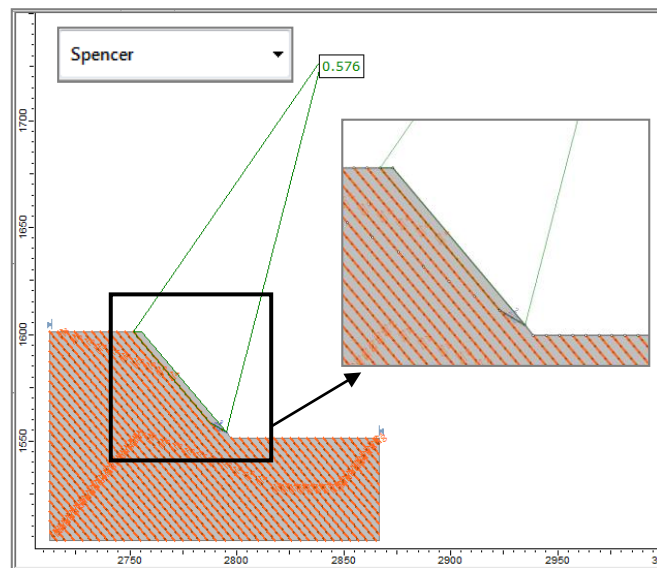
**Süreksizlik yüzeyindeki makaslama gerilmesine bağlı süreksizlik makaslama rijitliği

4.1. Tamamen Süreksizlik Kontrollü Çift Düzlemsel Yenilme Mekanizması

Yenilmenin tamamen süreksizlikler boyunca gerçekleşeceği tamamen süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizması için limit denge, sonlu elemanlar ve ayırık elemanlar yöntemleri kullanılarak şev duraylılığı analizleri gerçekleştirilmiştir. Limit denge analizlerinde kullanılan analiz modeli Şekil 9'da, Spencer yöntemine göre elde edilen analiz sonucu ise temsili olarak Şekil 10'da sunulmuştur. Tüm limit denge yöntemleri sonucunda elde edilen güvenlik katsayıları ise Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 9. Tamamen süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizması için limit denge analiz modeli

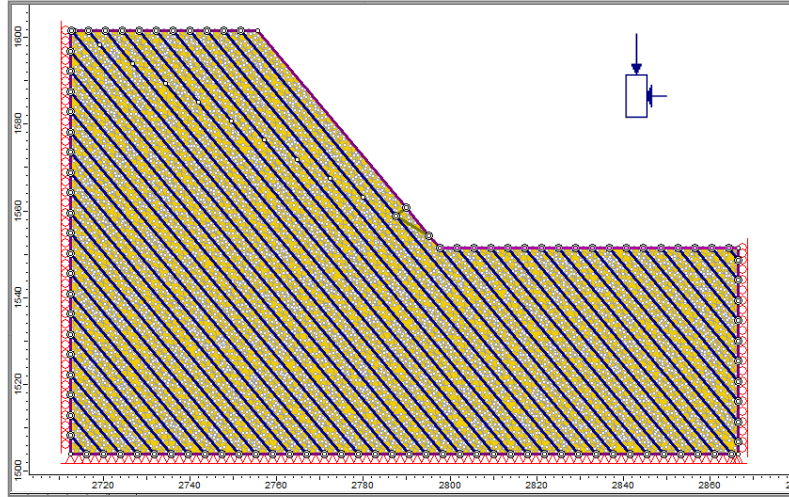


Şekil 10. Spencer yöntemine göre kritik kayma yüzeyi ve güvenlik katsayısı

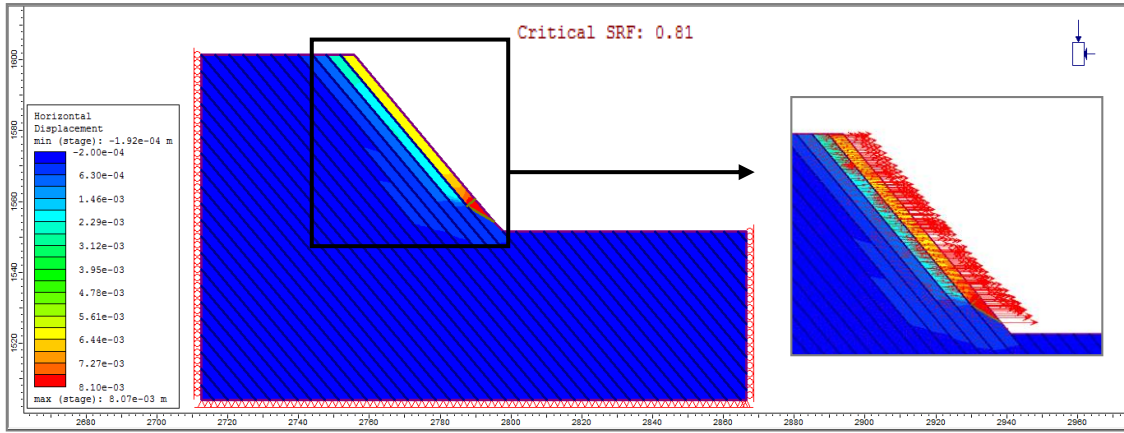
Tablo 3. Tamamen süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizması için limit denge analiz sonuçları

Yöntem	Janbu	Morgenstern-Price	Spencer
GK	0.55	0.56	0.58

Tamamen süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizması için gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan sonlu elemanlar modeli ve ağı Şekil 11’de, makaslama mukavemeti azaltımı tekniği kullanılarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar esaslı şev duraylılığı analiz sonucuna göre elde edilen kritik dayanım azaltım faktörü –güvenlik katsayısı- ile yatay deplasman kontur ve vektörleri ise Şekil 12’de verilmiştir. Sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre incelenen mekanizma için güvenlik katsayısı 0.81 olarak bulunmuştur.

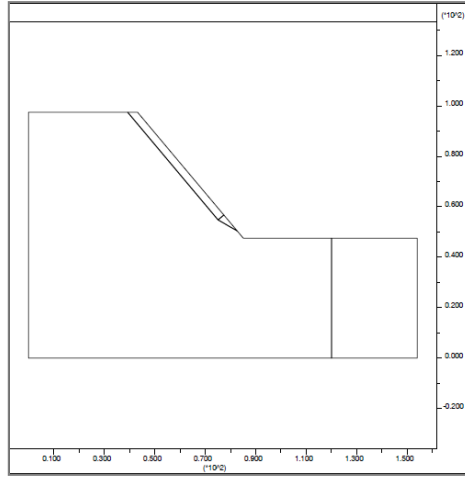


Şekil 11. Tamamen süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizması için sonlu elemanlar ağı

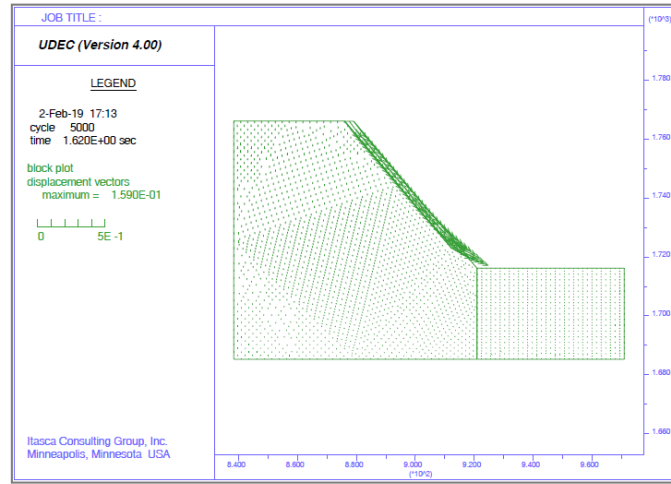


Şekil 12. Tamamen süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizması için yatay deformasyon kontur ve vektörleri

Tamamen süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizmasının duraylılık analizi için kullanılan ayırık elemanlar esaslı sayısal analiz modeli Şekil 13’te, analiz sonucunda elde edilen yenilme mekanizması ve deplasman vektörleri ise Şekil 14’te sunulmuştur. İlgili mekanizma için ayırık elemanlar analiz sonuçlarına göre güvenlik katsayısı 0.83 olarak belirlenmiştir.

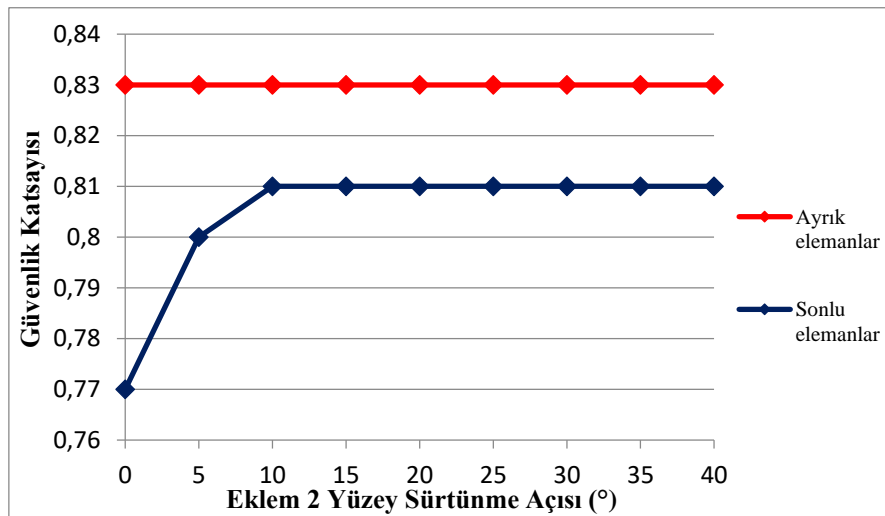


Şekil 13. Tamamen süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizması için ayırık elemanlar modeli



Şekil 14. Tamamen süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizması için ayırık elemanlar analiz sonuçları ve deplasman vektörleri

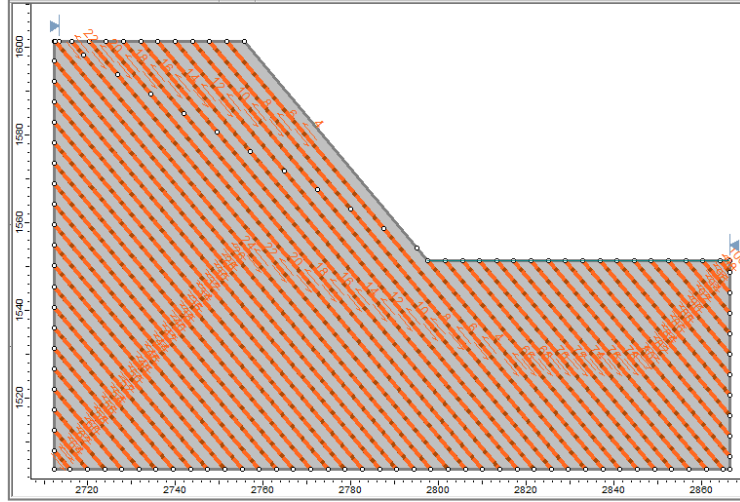
Bununla birlikte, Şekil 8'de 2 numaralı eklem olarak tanımlanmış olan tabakaya dik yönelime sahip süreksizliğin güvenlik katsayısına etkisi araştırılmıştır. Söz konusu eklem için yüzey sürtünme açısı değeri (ϕ) 0° ile 40° arasında 5° 'lik aralıklarla değişecek şekilde hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar ve ayırık elemanlar esaslı yöntemler için güvenlik katsayısı değerinin eklem 2 olarak adlandırılmış olan süreksizlik yüzeyi sürtünme açısı değeri ile değişimi Şekil 15'te verilmiştir.



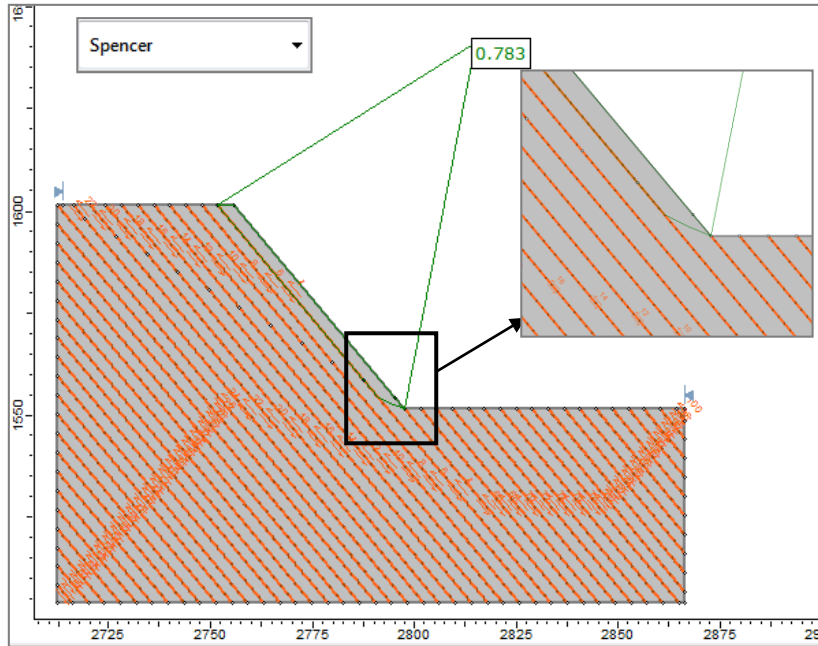
Şekil 15. Güvenlik katsayısının 2 numaralı eklem yüzeyi sürtünme açısı ile değişimi

4.2. Kısmi Süreksizlik Kontrollü Çift Düzlemsel Yenilme Mekanizması

Yenilmenin şev topoğunda yer alan kaya malzemesi içerisinde makaslama veya parçalanma yenilmesi sebebiyle gerçekleşeceği kısmi süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizması için şev duraylılığı analizleri limit denge, sonlu elemanlar ve ayırık elemanlar yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Limit denge analizlerinde kullanılan analiz modeli Şekil 16'da, Spencer yöntemine göre elde edilen analiz sonucu ise temsili olarak Şekil 17'de sunulmuştur. Tüm limit denge yöntemleri sonucunda elde edilen güvenlik katsayıları ise Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 16. Kısmi süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizması için limit denge analiz modeli



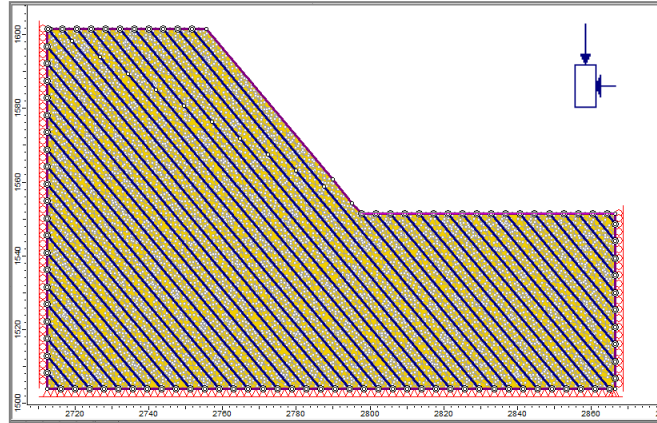
Şekil 17. Spencer yöntemine göre kritik kayma yüzeyi ve güvenlik katsayısı

Tablo 4. Kısmi süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizması için limit denge analiz sonuçları

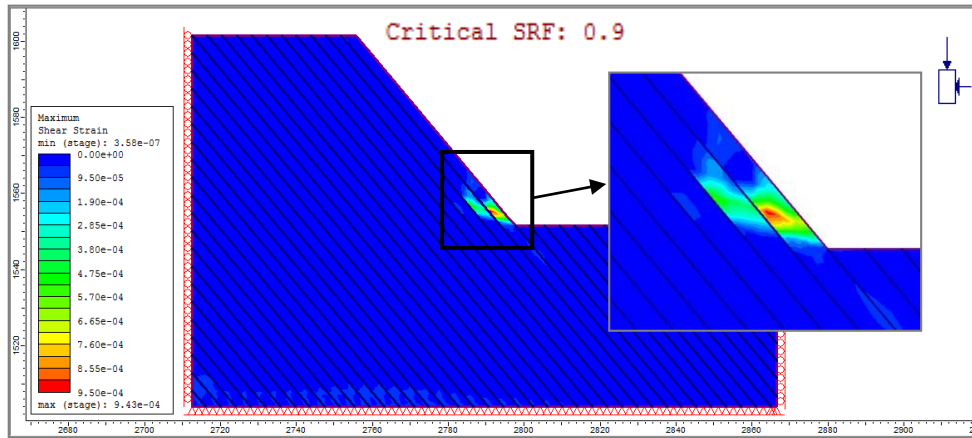
Yöntem	Janbu	Morgenstern-Price	Spencer
GK	0.66	0.70	0.78

Kısmi süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizması için gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan sonlu elemanlar modeli ve ağı Şekil 18'de, makaslama mukavemeti azaltımı tekniği kullanılarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar esaslı şev duraylılığı analiz sonucuna göre elde edilen kritik dayanım azaltım faktörü –güvenlik katsayısı- ile şev topoğunda oluşan maksimum birim deformasyon konturları

ise Şekil 19’da verilmiştir. Sonlu elemanlar analiz sonuçlarına göre incelenen mekanizma için güvenlik katsayısı 0.9 olarak bulunmuştur.

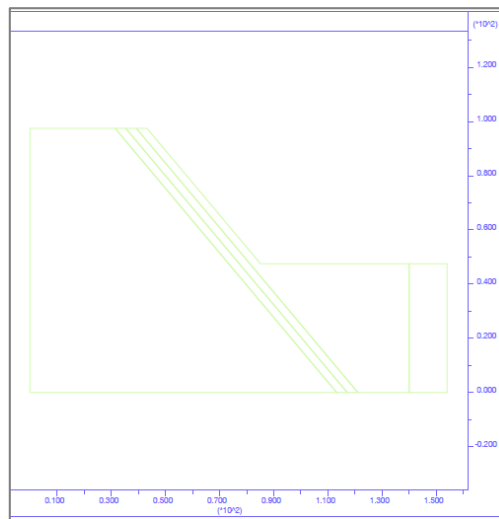


Şekil 18. Kısımlı süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizması için sonlu elemanlar ağı

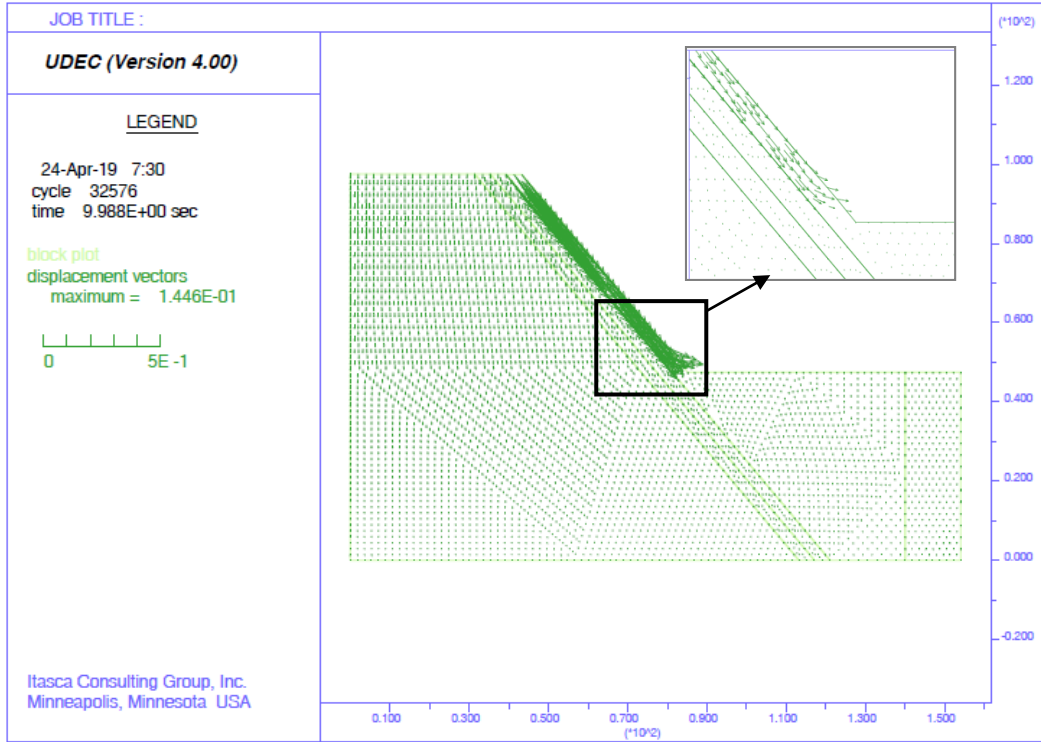


Şekil 19. Kısımlı süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizması için maksimum birim deformasyon konturları

Kısımlı süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizmasının duraylılık analizi için kullanılan ayrık elemanlar esaslı sayısal analiz modeli Şekil 20’de, analiz sonucunda elde edilen yenilme mekanizması ve deplasman vektörleri ise Şekil 21’de verilmiştir. İlgili mekanizma için ayrık elemanlar analiz sonuçlarına göre güvenlik katsayısı 0.82 olarak belirlenmiştir.

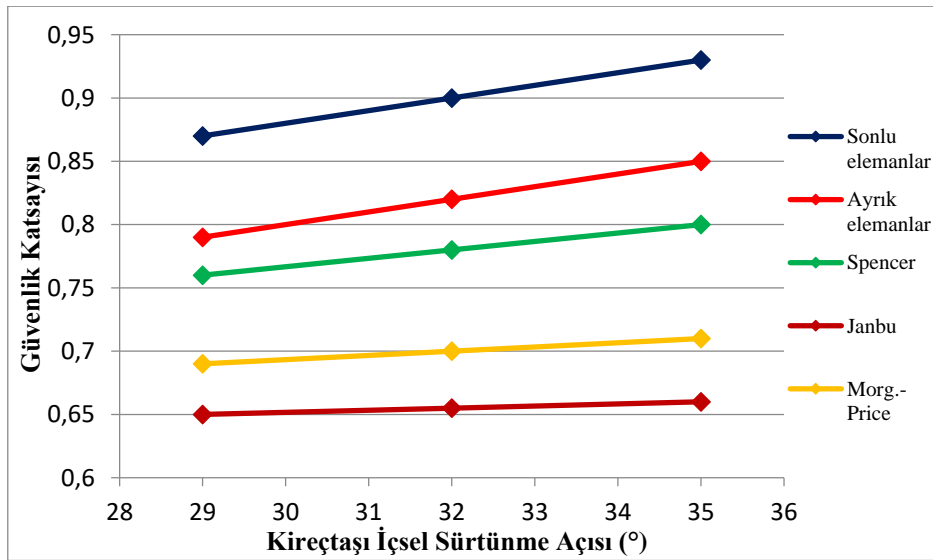


Şekil 20. Kısımlı süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizması için ayrık elemanlar modeli



Şekil 21. Kısmi süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizması için ayırık elemanlar analiz sonuçları ve deplasman vektörleri

Ayrıca, şevî oluşturan ve şev topuğundaki yenilmenin içerisinde meydana geldiği kireçtaşı birimi için tanımlanmış olan makaslama dayanım parametrelerinden içsel sürtünme açısı değerinin, şevin güvenlik katsayısına etkisinin belirlenmesi amacıyla hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Kireçtaşı birimi için başlangıçta 32° olarak tanımlanmış olan içsel sürtünme açısı değeri 3°'lik alt ve üst bant değerleri aralığında incelenmiş, güvenlik katsayısının birimin içsel sürtünme açısı değeriyle değişimi Şekil 22'de sunulmuştur.



Şekil 22. Güvenlik katsayısının kireçtaşı içsel sürtünme açısı ile değişimi

Çalışma kapsamında incelenen tamamen süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizması için elde edilen sonuçlara göre limit denge esaslı yöntemler kendi içinde oldukça uyumlu sonuçlar vermektedir. Ancak söz konusu limit denge esaslı yöntemler ile elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar esaslı sayısal analiz sonuçları ile kıyaslandığında %20 - %25 mertebesinde daha tutucu sonuçlar verdiği görülmektedir. Bununla birlikte, söz konusu yenilme mekanizması için gerçekleştirilen ayırık elemanlar esaslı sayısal analiz sonuçları ise sonlu elemanlar esaslı analiz sonuçları ile son derece yakın sonuçlar vermekte, sonuçlar %2 mertebesinde

değişmektedir. Ayrıca, tamamen süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizmasında şev eğimine dik yönde olan ve aktif blok ile pasif blok arasında yer alan süreksizliğin sürtünme açısının güvenlik katsayısına etkisi incelendiğinde; ayrık elemanlar yöntemi uyarınca yapılan hassasiyet analizlerine göre söz konusu süreksizliğin sürtünme açısının güvenlik katsayısını etkilemediği, sonlu elemanlar yöntemi uyarınca yapılan hassasiyet analizlerine göre ise süreksizliğin sürtünme açısının güvenlik katsayısını %2-%5 mertebesinde etkilediği belirlenmiştir.

Kısmi süreksizlik kontrollü çift düzlemsel yenilme mekanizması üzerinde gerçekleştirilen limit denge esaslı analiz sonuçlarına göre düzeltilmiş Janbu yönteminin Morgenstern-Price yöntemine göre %5, Spencer yöntemine göre %15 mertebesinde daha tutucu sonuçlar vermektedir. Söz konusu limit denge analiz yöntemleri ile elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar esaslı sayısal analiz yöntemi sonuçları ile karşılaştırıldığında, limit denge yöntemlerinin %10-26 aralığında daha tutucu sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Öte yandan, ayrık elemanlar yöntemi elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar yöntemi sonuçları ile kıyaslandığında ise, ayrık elemanlar yönteminin %8 mertebesinde daha tutucu sonuç verdiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, şev topuğunda yer alan birimlerin makaslama dayanımlarının güvenlik katsayısına etkisinin belirlenmesi için gerçekleştirilen hassasiyet analiz sonuçlarına göre, güvenlik katsayısının kaya malzemesinin içsel sürtünme açısındaki artışa bağlı olarak doğrusal şekilde arttığı belirlenmiştir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, eğim şevlerinde gözlenen ve klasik kinematik analizler ile değerlendirilmesi olanaksız olan 3 farklı yenilme mekanizması incelenmiştir. Söz konusu yenilme mekanizmalardan biri olan çift düzlemsel yenilme mekanizmasına ait bir örnek hem tamamen süreksizlik kontrollü yenilme mekanizması hem de kısmi süreksizlik kontrollü yenilme mekanizması için limit denge, sonlu elemanlar ve ayrık elemanlar yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Farklı analiz yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar birbiri ile karşılaştırılmıştır.

Limit denge yöntemi, göreceli olarak basit formülizasyonu, minimal girdi parametreleri ile hızlı ve kolay analiz yapılabilmesi ve dünya genelinde geniş çaplı tecrübe edinilmişliği nedeniyle son derece yaygın olarak kullanılan stabilitesi yöntemidir. Limit denge analiz yöntemi ile şev stabilitesi analizleri gerçekleştirilirken denge denklemlerinin hesaplanabilmesi için birtakım varsayımların yapılması gerekmekte, analiz sonuçları büyük ölçüde söz konusu bu varsayımların ne kadar gerçekçi olduğuna bağlı olmaktadır. Şev duraysızlığının yapısal elemanlar kontrolünde gerçekleşeceği problemlerde, tüm yenilme biçimlerinin ve dilimlerarası kuvvetlerin göz önünde bulundurulamaması nedeniyle yöntem dikkatli kullanılmalıdır.

Makaslama mukavemeti azaltımı tekniği kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analizlerde ise malzemenin gerilme-birim deformasyon davranışı dikkate alınmakta ve sayısal analiz sonuçları deformasyonlar hakkında bilgi sunmaktadır. Bu nedenle, sayısal analiz yöntemleri ile şev duraysızlık mekanizması ve kritik kayma ve/veya ayrılma yüzeylerinin belirlenmesi ve güvenlik katsayısı hesaplanması yönünden oldukça avantajlı olmakta, dolayısı ile limit denge analiz yöntemine bir alternatif olarak sunulmaktadır.

Kaynakça

- [1] Alejano, L. R., and Juncal, A. S., 2010. Stability analyses of footwall slopes in open pit mining. *Dyna*, Vol. 77, No. 161, Universidad Nacional de Colombia, Medellin.
- [2] Hoek, E., and Bray, J., 1974. Rock Slope Engineering. *Institute of Mining and Metallurgy, 1st Edition*. Spon Press, New York
- [3] Serra de Renobales, T., 1987. Strata buckling in footwall slopes in coal mining. *Congress of International Society of Rock Mechanics*, Montreal, s. 527-531.
- [4] Brawner, C. O., Pentz, D. L., and Sharp, J. C., 1971. Stability studies of a footwall slope in layered coal deposits. *Proc. 13th US Symposium on Rock Mechanics*, s. 329-365.
- [5] Dawson, R. F., Bagnall, A. S., and Barron, K., 1983. Rock anchor support systems at Smoky River Coal Limited. *Annual General Meeting of the Canadian Institute of Mining*, Grand Cache, Alberta, s. 22
- [6] Hawley, P. M., Martin, D. C., and Acott, C. P., 1986. Failure mechanics and design considerations for footwall slopes. *CIM Bulletin*, Vol. 79, No. 896, s. 47-53.

- [7] Alejano, L. R., Garcia-Bastante, F., Alonso, E., and Gomez-Marquez, I., 2001. Stability analysis and design of quarry slopes with the help of numerical modeling. *In: Proc. EUROCK 2001*, Espoo, Finland, Rotterdam: Balkema; 2001.
- [8] Calder, P. N., and Blackwell, G. H., 1980. Investigation of a complex rock displacement at Brenda Mines. *Canadian Mining & Metallurgical Bulletin*, August 1980, s. 1-10.
- [9] Watters, R. J., and Inghram, B. J. (1983). Buckling failure of granite slabs in natural rock slopes as an indications of high residual stresses. *Idaho Transportation Department, Division of Highways*, Boise, Idaho, USA, s. 83-96
- [10] Watters, R. J., and Roberts, K., 1995. The Kaiser effect and it's applications to slope instability. *5th Conference on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials*. Pennsylvania State University: Trans Tech. Publications, s. 233-242.
- [11] Stead, D., and Eberhardt, E., 1997. Developments in the analysis of footwall slopes in surface coal mining. *Engineering Geology, Vol. 46, No. 1*, s. 41-61.
- [12] RS2 2019, 2018. 2 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi esaslı bilgisayar programı. Rocscience Inc. Toronto.
- [13] UDEC v4.0 – The Universal Distinct Element Code, 2004. 2 boyutlu ayırık elemanlar yöntemi esaslı bilgisayar programı. Itasca Consulting Group. Minneapolis, Minnesota.
- [14] Dawson, E. M., Roth, W. H., and Drescher, A., 1999. Slope stability analysis by strength reduction. *Geotechnique*, Vol. 49, No. 6, s. 835-840.
- [15] Alejano, L. R., Ferrero, A. M., Ramirez-Oyanguren, P., Alvarez Fernandez, M. I., 2011. Comparison of limit equilibrium, numerical and physical models of wall slope stability. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 48, s. 16-26.
- [16] Cavers, D. S., 1981. Simple methods to analyze buckling of rock slopes. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, Vol. 14, s. 87-104.
- [17] Chen, G., Langsheng, W., and Tianbinong, L., 1991. On the deformation starting criterion of sliding-bending model in dip slope. *Sixth International Symposium on Landslides*, Christchurch, New Zealand, Feb. 10-14, 1992, Vol. 6, s. 355-360.
- [18] Nathanail, C. P. (1996). Kinematic analysis of active/passive wedge failure using stereographic projection. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 33, No. 4, s. 405-407.
- [19] Eberhardt, E., and Stead, D., 1998. Mechanisms of slope instability in thinly bedded surface mine slopes. *Proc: 8th International Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment*, Vancouver, BC, Canada, Sept. 21-25, 2018, vol.8, no. 5, s. 3011-3018.
- [20] Goodman, R. E., and Kieffer, S. D. (2000). Behavior of rock in slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126, No. 8, s. 675-684.
- [21] Hoek, E. (2000). *Rock Engineering Course Notes by Evert Hoek (2000 Edition)*. North Vancouver, B. C., s. 313.
- [22] Slide2 2018, 2018. 2 boyutlu limit denge yöntemi esaslı bilgisayar programı. Rocscience Inc. Toronto.
- [23] Morgenstern, N. R., and Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, vol. 15, no. 1, s. 79-93.
- [24] Spencer, E., 1973. Thrust line criterion in embankment stability analysis. *Geotechnique*, vol. 23, no. 1, s. 85-100.
- [25] Janbu, N., 1973. Soil stability computations. *In: Embankment-Dam Eng., Casagrande Volume*, John Wiley & Sons, Inc., New York, s. 47-86.