

ZEMİN ÇİVİLİ KAYA ŞEVLERİN STABİLİTE ANALİZLERİNDE BÜNYE MODELİNİN VE YAPISAL ELEMANLARIN ETKİSİ

THE INFLUENCE OF STRUCTURAL ELEMENTS AND MATERIAL MODEL IN THE ANALYSIS OF NAILED ROCK SLOPES

Akın GÖKGÖZ¹, M. Kubilay KELESOĞLU²

ÖZET

Günümüzde şev yenilmelerini engellemek amacıyla zemin çivili destek sistemleri ekonomik avantajları ve imalat hızları nedeniyle oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür dayanma yapılarının tasarımında limit denge ve sonlu elemanlar analizleri kullanılarak hem güvenlik sayısı (FoS) hem de çivi kuvvetleri hesaplanmaktadır. FoS hesaplarında kullanılan iki boyutlu limit denge analizlerinin (LEM) esas göçme yüzeyi üzerindeki zemin kütlelerinin kuvvet veya moment dengesini hesaplamak olduğu için şev hareketleri hakkında herhangi bir bilgi vermemektedir. Bu nedenle son yıllarda şev stabilite analizlerinde oldukça popüler olan mukavemet azaltma yöntemi (SRM) kullanılmaktadır. Bu çalışmada zemin çivileri ile güçlendirilmiş kaya şevlerin stabilite analizlerinde kaya parametrelerinin ve çelik elemanların etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında ilk olarak püskürtme beton kaplaması ve başlık plakası etkileşiminin şev stabilitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak güvenlik sayıları, kayma yüzeyleri, deformasyon miktarları ve çivi kuvvetleri incelenmiştir. Daha sonra mukavemet azaltma yöntemi ile analiz edilen zemin çivili ayrışmış kaya şevler için seçilen göçme kriterinin önemini ortaya koyan bir çalışma yürütülmüştür. Bu durumu incelemek üzere farklı mineralojik özelliklere sahip zemin çivili şevler için farklı SRM yaklaşımlarıyla analizler yürütülmüş ve göçme kriterinin sonuçlar üzerindeki göz ardı edilemez etkileri ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Mukavemet Azaltma Yöntemi, Sonlu Farklar Metodu, Şev Stabilitesi, Zemin Çivisi

ABSTRACT

Soil nail support systems are widely used due to their economic advantages and production speed to prevent slope failures. In the design of such structures, both the factor of safety (FoS) and nail forces are calculated using limit equilibrium and finite element analysis. Since

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Beykent Üniversitesi, İnşaat Teknolojisi Prog., akingokgoz@beykent.edu.tr (Sorumlu yazar)

² Doç. Dr., İstanbul Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, kelesoglu@iuc.edu.tr

the basis of the two-dimensional limit equilibrium analysis (LEM) used in FoS calculations is to calculate the force or moment balance of the soil mass on the failure surface, it does not provide any information about the slope movements. For this reason, the strength reduction method (SRM), which has been very popular in slope stability analysis in recent years, has been used. In this study, the effect of rock parameters and structural steel elements on the stability analysis of nailed rock slopes was investigated. Within the scope of the study, firstly, the effect of shotcrete coating and head plate interaction on slope stability was investigated. FoS values, failure surfaces, deformation mods, and nail forces were investigated. A parametric study was carried out to reveal the importance of the chosen failure criterion for nailed weathered rock slopes analyzed by the strength reduction method. To examine this situation, analyzes were carried out with different SRM approaches for nailed slopes with different mineralogical properties, and the inevitable influence of the failure criterion on the results was revealed.

Keywords: *Strength Reduction Method, Finite Difference Method, Slope Stability, Soil Nail*

1. GİRİŞ

Zemin çivisi uygulanan kaya şevlerin stabilite hesaplarında limit denge ve sonlu elemanlar analizleri kullanılarak hem güvenlik sayısı (FoS) hem de çivi kuvvetleri hesaplanabilir. Güvenlik sayısı analizlerinde kullanılan limit denge analizlerinin (LEM) esası göçme yüzeyi üzerindeki zemin kütesinin kuvvet veya moment dengesini hesaplamak olduğu için şev hareketleri hakkında herhangi bir bilgi vermemektedir. Bu nedenle son yıllarda şev stabilite analizlerinde oldukça popüler olan mukavemet azaltma yöntemi (SRM) kullanılmaktadır. Bu yöntem, şev üzerinde yenilme meydana gelene kadar kayma mukavemeti parametrelerinin sistematik bir şekilde azaltılması esasına dayanır. Bu yöntemin kullanılmasıyla elde edilen mukavemet parametreleri c'_m ve ϕ'_m aşağıdaki bağıntılarla (Denklemler 1) elde edilir. Zienkiewicz vd. (1975), Griffiths ve Lane (1999), Cai ve Ugai (2000), Wei vd. (2009) şev stabilite problemlerinde SRM yöntemini kullanan araştırmacılara örnek olarak gösterilebilir.

$$c'_m = \frac{c'}{GS_{SRM}} \quad \phi'_m = \tan^{-1} \left(\frac{\tan(\phi')}{GS_{SRM}} \right) \quad (1)$$

Zeminlerde göçme durumu ve stabilite analizleri Mohr-Coulomb (MC) zemin modeli ile birlikte makul bir geçerlilikle tanımlanabilir. Ancak kaya ortamların göçme davranışının doğrusal olmayan Hoek-Brown (HB) yenilme kriteri (Hoek vd., 2002) ile tanımlanması oldukça yaygındır. Konuyla ilgili çalışmaları bulunan Li vd. (2008), Chakraborti vd. (2012), Shen ve Karakus (2014) şevlerin sayısal modellemesi yapılırken genellikle doğrusal MC kriterine dayanan SRM'ye başvurulduğunu, ancak kaya kütlelerinin doğrusal olmayan bir gerilme fonksiyonuna sahip olduğunu bu nedenle doğrusal MC kriteri ile temsil edilmesinin yetersiz olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak, ayrılmış kaya ve kaya kütlelerinde stabilite analizi yapılırken araştırmacılar tarafından farklı metotlar uygulanmıştır. Bu metotlar; eşdeğer MC parametrelerinin azaltılması, lokal MC parametrelerinin azaltılması ve doğrudan HB parametrelerinin azaltılması şeklinde olabilmektedir.

1.1. Eşdeğer Mohr-Coulomb Parametreleri ile SRM Analizi (E-MC)

Doğrusal mukavemet azaltma yönteminde en çok kullanılan ve oldukça basit olan yöntem eş değer MC yöntemidir. Bu yöntemde doğrusal olmayan HB eğrisine Şekil 1a'da gösterildiği gibi en uygun doğrusal MC eğrisi uydurulmaktadır (Hoek ve diğ., 2002). Daha sonra doğrusal olan eş değer MC kırılma zarfı göçme anına kadar kademeli olarak azaltılarak şeve ait güvenlik sayısı Denklem 2'deki gibi hesaplanır (Duncan, 1996).

$$FoS_{SRM} = \frac{c'}{c'_r} = \left(\frac{\sin(\phi')}{\sin(\phi'_r)} \right) \quad (2)$$

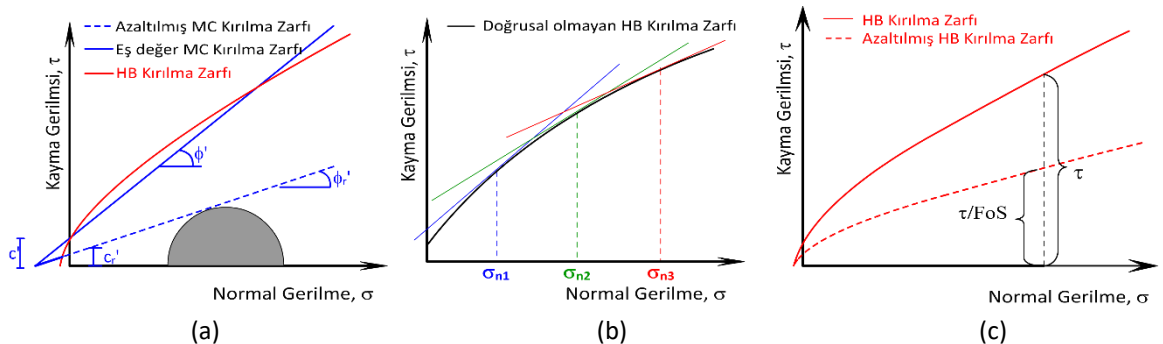
1.2. Lokal Mohr-Coulomb Parametreleri ile SRM Analizi (L-MC)

Bu yöntemde, doğrusal olmayan HB kırılma zarfı eş değer MC yönteminde olduğu gibi tek bir eğri ile temsil edilmesi yerine lokal olarak her bir σ_3 gerilme durumu için ayrı ayrı birden fazla MC eğrisi ile temsil edilmektedir. Şekil 1b'de doğrusal olmayan HB kırılma zarfına lokal olarak uydurulan MC kırılma zarfları temsili olarak gösterilmiştir. MC parametreleri, lokal olarak σ_3 gerilme durumuna göre HB kriterlerinden türetilmektedir. Daha sonra elde edilen lokal c'_i ve ϕ'_i değerleri göçme durumuna kadar azaltılır (Denklem 3) (Fu & Liao, 2010).

$$c'_{im} = \frac{c'_i}{FoS_{SRM}} \quad \phi'_{im} = \tan^{-1} \left(\frac{\tan(\phi'_i)}{FoS_{SRM}} \right) \quad (3)$$

1.3. Hoek-Brown Parametreleri ile SRM Analizi (HB-R)

Hammah vd. (2005) tarafından önerilen bu metot, kaya şevlerde genelleştirilmiş HB kriterini mukavemet azaltma yönteminde doğrudan kullanmaya imkân vermektir. Güvenlik sayısı hesaplamasında doğrusal olmayan HB kırılma zarfının düşey eksen değeri olan kayma gerilmesi (τ) Şekil 1c'de görüldüğü gibi şevde göçme meydana gelene kadar bir katsayı ile bölünerek azaltılır.



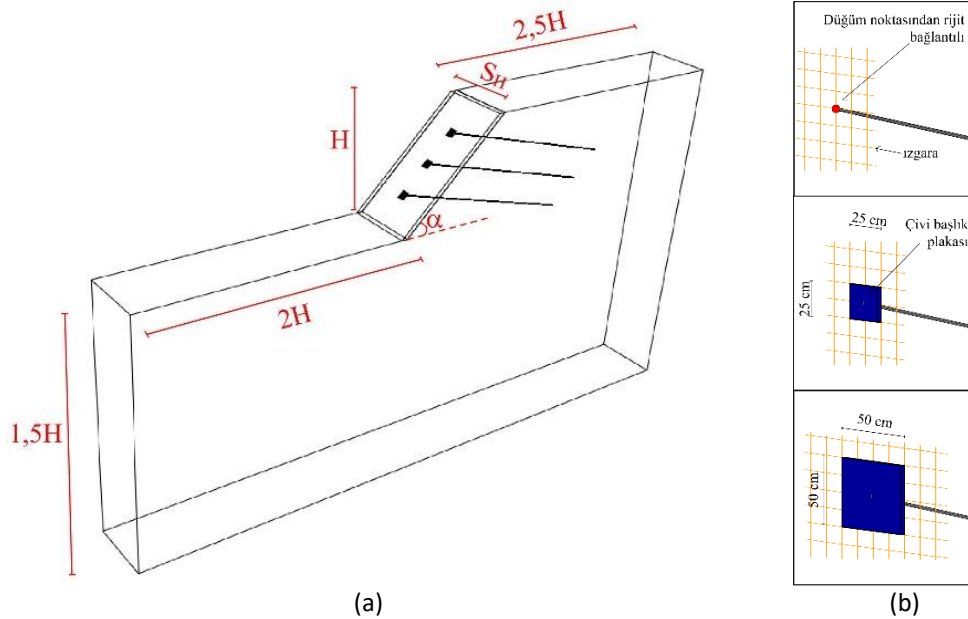
Şekil 1. a) Eş değer MC, b) Lokal MC ve c) Doğrusal olmayan HB zarfının indirilmesi metotları.

Daha sonra bir katsayı ile azaltılarak oluşturulan yeni eğri için en uygun HB sınıflandırma parametreleri bulunur. Bu parametreler; $D=0$ varsayılarak, σ_{ci} azaltım sayısı ile bölünerek, GSI ve m_i değerleri için de en uygun tahmin yapılarak bulunur. Elde edilen yeni parametreler

ile geleneksel sonlu elemanlar elasto-plastik analiz yapılır. Şev göçme durumuna gelinceye kadar bu işlemler tekrar edilir. Şevde yenilme meydana getirecek olan FoS değeri güvenlik sayısı olarak belirlenir.

2. SAYISAL MODELLEME VE DOĞRULAMA ANALİZLERİ

Sayısal analizler yürütülürken zemin çivisi ve kaplamasına ait tüm yapısal elemanlar dikkate alınarak, çivi kuvvetleri üzerinde etkili olan gerilme ve deplasman şartlarının en doğru şekilde gelişmesi (mobilize olması) ve deformasyon modlarının da gerçekçi bir şekilde oluşması amaçlanmıştır. Analizlerde ayrılmış kaya malzeme parametreleri için verilen Hammah ve diğ. (2005)'nin çalışmalarında kullandıkları HB kaya parametreleri; tek eksenli basınç dayanımı (σ_{ci}) 30 MPa, $m_i=2$, $GSI=5$, $\gamma=25 \text{ kN/m}^3$ ve MC parametreleri olan $c=20 \text{ kPa}$, $\phi=21^\circ$ ve $E=220 \text{ MPa}$ tercih edilmiştir. Püskürtme beton kaplama ise MC bünye modeli ile hacimsel eleman olarak tanımlanmış ve Eurocode 2 (2005)'de önerilen değerler referans alınmıştır; $c=500 \text{ kPa}$, $\phi=9^\circ$, $\sigma_{tensile}=1710 \text{ kPa}$, $\gamma=24 \text{ kN/m}^3$, $E=27,264 \text{ MPa}$ ve $\nu=0,2$ olarak belirlenmiştir. Literatürde zemin ile duvar yüzeyi arasındaki kullanılan sürtünme açısı (δ°) değeri $0,3\phi-0,7\phi$ aralığında değişmektedir (Das, 2007; Lin vd., 2017; Marzionna vd., 1998; Terzaghi, 1943; Terzaghi ve Peck, 1967). Sayısal analizlerde duvar ile zemin arasındaki sürtünme etkileşimi (δ) içsel sürtünme açısının (ϕ°) $2/3$ katı olduğu varsayılarak modellenmiştir. Zemin çivileri başlık plakaları ile birlikte ve başlık olmadan rijit bağlantılı olarak modellenmiştir. Başlık plakaları kare ($25 \times 25 \times 2 \text{ cm}$ ve $50 \times 50 \times 2 \text{ cm}$) şeklinde çelik malzeme özellikleri ile liner eleman olarak modellenmiştir (Şekil 2b). Sonlu farklar modeli ızgara bölge elemanları, analiz için önem arz eden kaplama yakınlığında ve olası kayma düzlemi bölgelerinde daha sıkı ($15-50 \text{ cm}$ boyutlarında), şev genelinde ortalama $1,0 \text{ m}$ boyutlarında ve model sınırlarına yaklaşıncı daha geniş ($2,0 \text{ m}$) boyutlarda olacak şekilde oluşturulmuştur. Şev geometrisine ait uzunluk değerleri literatürde (Kim vd., 2013; Wei ve Cheng, 2010; Yuan vd., 2013; Zhang vd., 2003) kullanılan değerler referans alınarak belirlenmiştir (Şekil 2a).



Şekil 2. a) Şev geometrisi, b) Çivi başlığı bağlantı tipleri.

2.1. Doğrulama Analizleri

Doğrulama analizleri için oluşturulan sayısal modellerle literatürde kabul görmüş olan birkaç sayısal problem analiz edilerek sonuçları kıyaslanmıştır. Sayısal problemlerden birincisi; Wei ve Cheng (2008) tarafından araştırılan 6 m yüksekliğinde, 45° eğimli zemin çivili bir şev problemidir. Zemine ait kohezyon değeri 9 kPa, içsel sürtünme açısı 18°, Elastisite modülü 15 MPa, Poisson oranı 0,42 ve birim ağırlığı 19 kN/m³ olarak belirtilmiştir. Zemin çivileri yatayda ve düşeyde 1,5 m aralıklı olarak 8 m uzunluğunda, yatayla 0° açı yapacak şekilde ve 50x50 cm boyutlu başlıklı olarak modellenmiş ve FoS değerleri hesaplanmıştır. İkincisi; Kim vd. (2013) tarafından gerçekleştirilen 10 m yüksekliğinde, 3 m genişliğinde ve 60° eğimli zemin çivili bir şev modelidir. Zeminine ait kohezyon değeri 20 kPa, içsel sürtünme açısı 25°, Elastisite modülü 100 MPa, Poisson oranı 0,3 ve birim ağırlığı 20 kN/m³ olarak belirtilmiştir. Zemin çivileri 12 m uzunluğunda ve 105 mm çapındadır. Zemin çivilerinin başlık plaka boyutları ise 2x2 m kare şeklinde ve 50 cm kalınlığındadır. SRM analizleri zemin çivileri ile birlikte ve zemin çivileri olmadan yürütülerek FoS değerleri hesaplanmıştır. Doğrulama analizi sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Doğrulama analiz sonuçlarının kıyaslanması.

Referans	Model Bilgisi	Referans FoS	Bu çalışma FoS
Wei ve Cheng (2008)	Zemin çivisiz	1,11	1,09
	Zemin çivisi + Başlık	1,28	1,29
Kim vd. (2013)	Zemin çivisiz	1,15	1,15
	Zemin Çivisi + Başlık	1.55	1,52

Çalışmanın diğer aşamasında kullanılacak olan FLAC3D sonlu farklar modelinin doğrulama analizi için literatürde oldukça kabul gören ve birçok araştırmacının (Fu ve Liao, 2010; Detournay vd., 2011; Chakraborti vd., 2012; Itasca, 2019; Wei vd., 2020) referans aldığı şev problemi tercih edilmiştir. Hammah vd. (2005) tarafından literatüre kazandırılan şev geometrisi 45° eğim ve 10 m yükseklikten oluşmaktadır. Şevi oluşturan malzemeye ait tek eksenli basınç dayanımı $\sigma_{ci} = 30$ MPa, GSI=5, $m_i = 2$, birim hacim ağırlığı 25 kN/m³, Elastisite modülü 5 GPa ve Poisson oranı 0,3 olmaktadır. Doğrulama analizi sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 2’de gösterilmiştir. Tablo 1 ve Tablo 2 incelendiğinde literatürde oldukça bilinen ve kabul görmüş problemlerin güvenlik sayısı sonuçları ile hazırlanan model sonuçlarının benzer olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla hazırlanan model çalışma kapsamında yürütülecek olan sayısal analizler için oldukça uygundur.

Tablo 2. Doğrulama analiz sonuçlarının kıyaslanması.

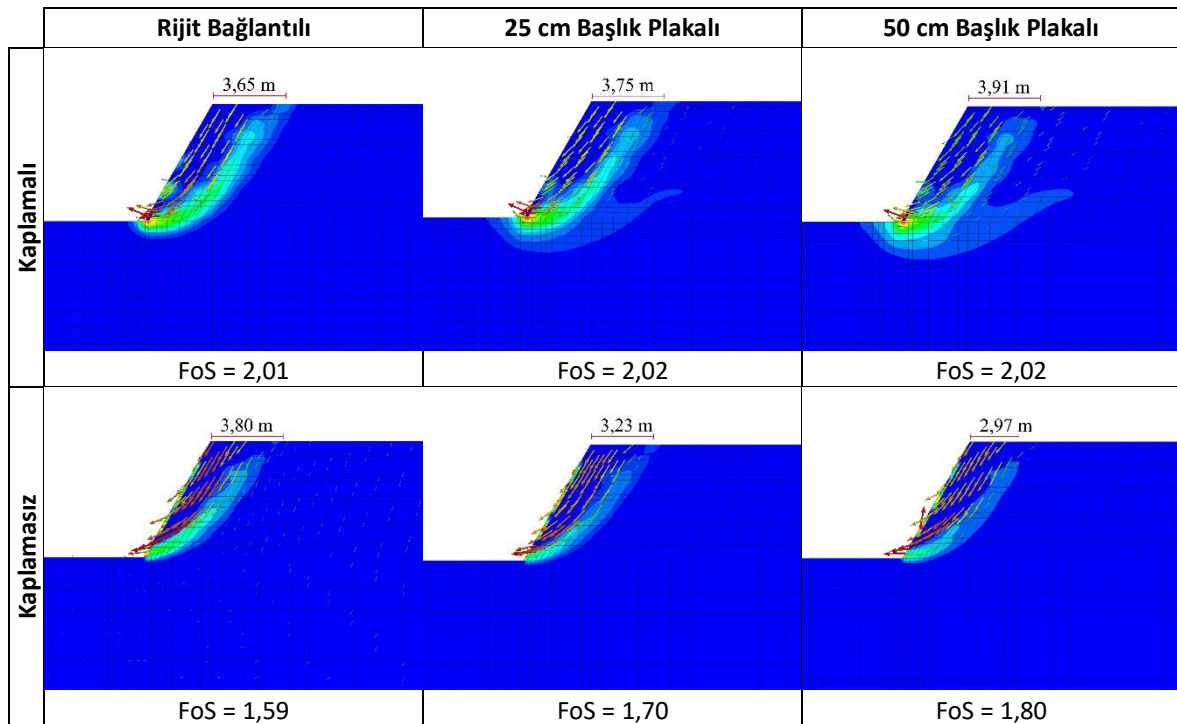
Araştırmacı	Metod	FoS
Hammah vd. (2005)	Genelleştirilmiş Hoek-Brown (SRM)	1.15
	Eş Değer Mohr-Coulomb (SRM)	1.15
	Basitleştirilmiş Bishop Metodu (LEM)	1.153
	Spencer Metodu (LEM)	1.152
Bu çalışma	E-MC	1.16
	L-MC	1.16
	HB-R	1.15

3. BULGULAR

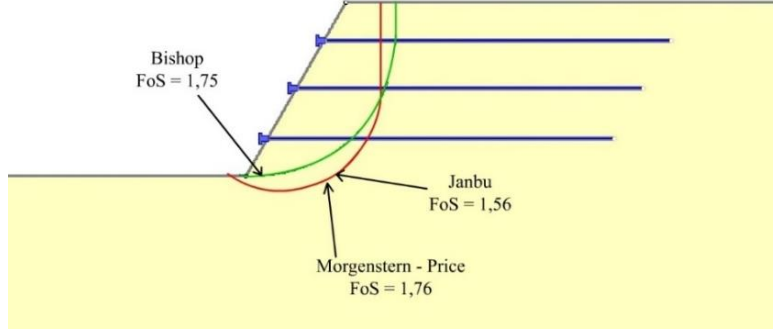
3.1. Püskürtme Beton Kaplaması ve Çivi Başlığının Etkisi

Yapılan çalışmalardan ilki ayrıntılı olarak modellenen püskürtme beton kaplaması ve çivi başlık plakası etkileşiminin şev stabilitesi üzerindeki etkisini araştırmaktır. Bu amaçla farklı şev açıları, yükseklikleri, çivi uzunlukları ve başlık plakası durumları için analizler yürütülmüştür. Sonuç olarak güvenlik sayıları, kayma yüzeyleri, deformasyon miktarları ve çivilere gelen kuvvetler incelenmiştir.

Şev eğimi $\alpha=60^\circ$, yüksekliği $H=6$ m ve uzunluğu $L=12$ m olan modelde SRM ile yapılan analizlerden elde edilen bulgulara göre; kaplamanın varlığı kaplamasız modele göre güvenlik sayılarını önemli ölçüde (%12 ila %26 arasında) arttırmaktadır. Plakanın varlığı kaplamalı modelde güvenlik sayılarını etkilemezken kaplamasız modelde FoS değerini 1,59'dan 1,80'e kadar çıkarmaktadır. Zemin çivisi başlık tiplerinin her iki modelde de maksimum çivi kuvvetleri üzerinde etkili olduğu anlaşılmaktadır. Kaplamanın modellenmesi kayma düzlemlerinin şeklinde değişim meydana getirdiği görülmektedir. Kaplamasız modelde kayma düzlemi şev topuğundan geçerken kaplamalı modelde hesaplanan göçme düzlemi ise daha derinlerde meydana gelmektedir (Şekil 3). Limit denge analizi sonucu elde edilen FoS değerleri incelendiğinde; LEM'den elde edilen FoS değerlerinin kaplamasız model sonuçlarına oldukça yakın olduğu dikkat çekmektedir (Şekil 4). Ancak LEM ile elde edilen kayma düzleminin SRM ile elde edilen kayma düzlemi ile tam olarak uyuşmadığı anlaşılmaktadır.

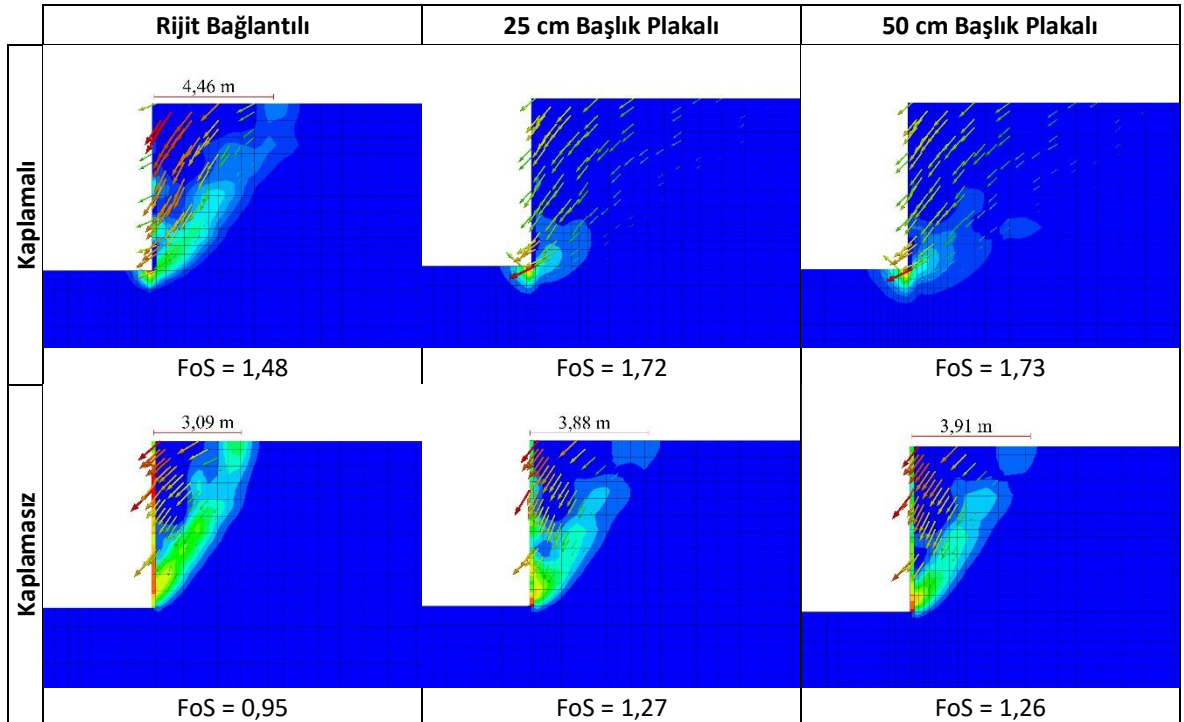


Şekil 3. FEM sonucu hesaplanan FoS, kayma düzlemleri ve deplasman vektörleri ($\alpha=60^\circ$, $H=6$ m, $L=12$ m).

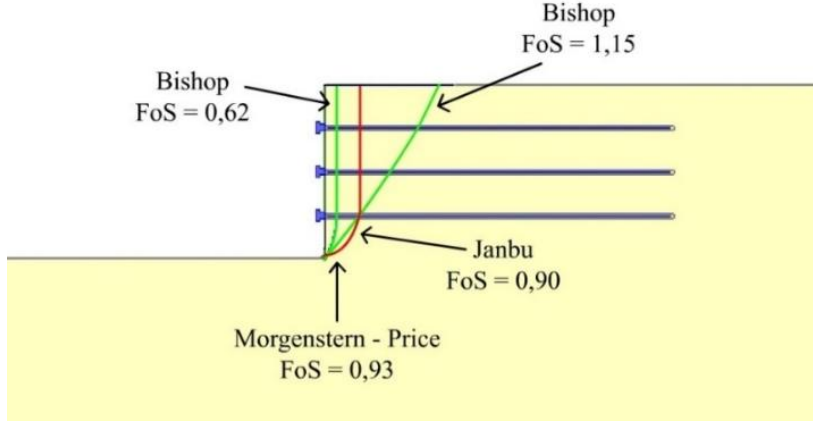


Şekil 0. LEM sonucu hesaplanan FoS ve kayma düzlemleri ($\alpha=60^\circ$, $H=6$ m, $L=12$ m).

Şev eğimi $\alpha=90^\circ$, yüksekliği $H=6$ m ve uzunluğu $L=12$ m olan modelde SRM ile yapılan analizlerden elde edilen bulgulara göre; kaplamanın varlığı kaplamasız modele göre FoS değerlerini önemli ölçüde (%35 ila %56 arasında) arttırmaktadır. Başlık plakasının varlığı kaplamalı ve kaplamasız modelde güvenlik sayılarını önemli ölçüde arttırmaktadır. Kaplamalı modelde zemin çivilerinin rijit bağlantı yerine 25 cm başlık plakası ile modellenmesi güvenlik sayısını %16 kadar artırıp 1,48 değerinden 1,72'ye çıkarmaktadır. Kaplama olmadan yürütülen stabilite analizinde ise bu değer %34 artışla 0,95'den 1,27'ye çıkmaktadır. Kaplamalı ve kaplamasız modelde rijit bağlantılı çivilerle hesaplanan FoS değerlerinin plakalı başlık tipine göre daha düşük mertebelerde olduğu dikkat çekmektedir. Kaplamanın modellenmesi durumunda kayma düzlemlerinin şekli önemli ölçüde etkilenmiştir. Kaplamalı modelde rijit bağlantı durumunda belirgin bir kayma düzlemi oluşurken plakalı modellerde belirgin bir kayma düzlemi görülmemektedir (Şekil 5).



Şekil 5. FEM sonucu hesaplanan FoS, kayma düzlemleri ve deplasman vektörleri ($\alpha=90^\circ$, $H=6$ m, $L=12$ m).



Şekil 6. LEM sonucu hesaplanan FoS ve kayma düzlemleri ($\alpha=90^\circ$, $H=6$ m, $L=12$ m).

LEM analizleri ile oluşan kayma düzlemlerinin SRM analizleri ile uyuşmadığı görülmektedir. Janbu ve Morgenstern-Price yöntemleri ile elde edilen FoS değerlerinin kaplamasız modelde rijit bağlantılı FoS değerine daha yakın olduğu söylenebilir. SRM analizleri ile elde edilen kayma düzlemine benzer bir dairesel olmayan kayma düzlemi üzerinde FoS değerini hesapladığımız takdirde elde edilen değer kaplamasız modellerde hesaplanan değerlerin ortalamasına denk olduğu görülmektedir (Şekil 6).

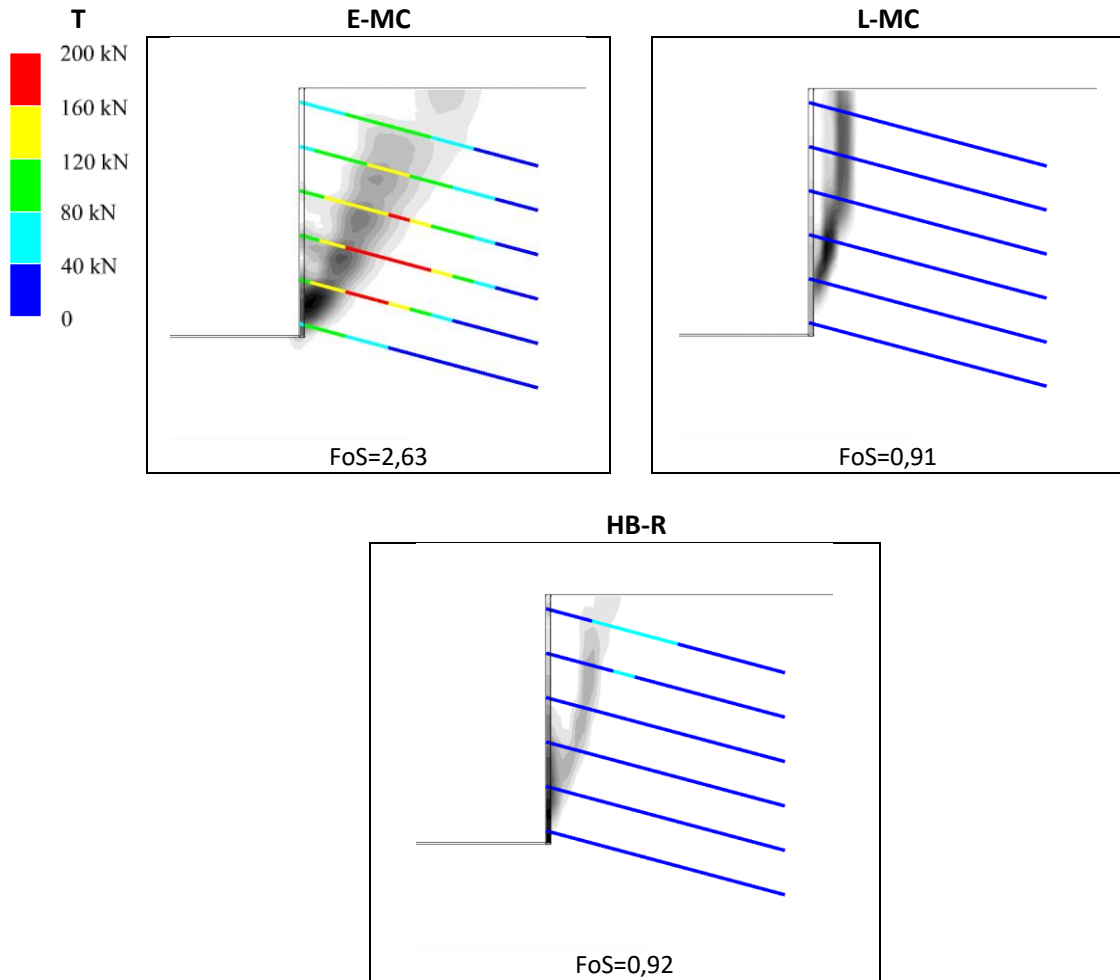
3.2. Doğrusal Olmayan Mukavemet Azaltma Yöntemlerinin Etkisi

Çalışmanın ikinci bölümünde, zemin çivileri kullanılarak güçlendirilmiş ayrıışmış kaya şevlerin farklı mukavemet azaltma yaklaşımları ile analiz edilmeleri durumunda güvenlik sayıları kıyaslanmıştır. Stabilité analizleri genellikle doğrusal olmayan HB sınıflandırma sisteminden elde edilen doğrusal eş değer MC kriterinin göçme anına kadar sistematik bir şekilde azaltılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Ancak bazı zeminler ve kaya kütleleri doğrusal olmayan yenilme davranışı sergiledikleri için doğrusal MC kriteri ile gerçekçi bir şekilde temsil edilemez. Bu çalışmada SRM analizleri; (i) eş değer MC parametreleri azaltılarak, (ii) lokal olarak hesaplanan eş değer MC parametreleri azaltılarak ve (iii) doğrusal olmayan HB parametreleri azaltılarak gerçekleştirilmiştir.

- GSI=5 ve $m_i=2$ (çok ayrıışmış, kil dolgulu kilaşı) parametreleri kullanılarak yapılan analizlerden elde edilen bulgulara göre eş değer Mohr-Coulomb (E-MC) ve lokal Mohr-Coulomb (L-MC) yöntemleri ile elde edilen güvenlik sayılarının benzer olduğu anlaşılmaktadır (Tablo 3). Doğrusallaştırma yapılmadan orijinal HB kırılma zarfının azaltılması (HB-R) sonucunda nispeten daha yüksek (%5 mertebesinde) FoS değerleri elde edilmektedir.
- GSI=5 ve $m_i=10$ (çok ayrıışmış, kil dolgulu şist) parametreleri kullanılarak yapılan analizlerden elde edilen bulgulara göre hesaplanan en yüksek FoS değeri E-MC analizi sonucu ($FoS=2,12$) en düşük FoS değeri ise HB-R analizi sonucu ($FoS=1,99$) olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre $m_i=10$ için yapılan analizlerde orijinal HB göçme modeli eğrisinin azaltılması neticesinde hesaplanan FoS değerleri eş değer MC ile hesaplanan değerlerden daha düşüktür. Ancak $m_i=2$ için yapılan analizlerde bu sonuçların tersi bir davranış elde edilmektedir. Orijinal HB modelinde özellikle düşük normal gerilme değerlerine karşılık gelen kayma mukavemeti değerleri eş

değer MC modelinden oldukça düşüktür. Bu etkinin oluşmasında eş değer MC modelini oluşturan kohezyon bileşeninin etkili olduğu söylenebilir. Bu durumun sonucu olarak tabaka içinde normal gerilme değerlerinin düşük olduğu özellikle yüzeye yakın seviyelerdeki kayma mukavemetinin HB-R ile daha düşük değerlerde hesaplanması söylenebilir.

- GSI=5 ve $m_i=20$ (çok ayrılmış, kil dolgulu Grovak/Kumtaşı) parametreleri kullanılarak yapılan analizlerden elde edilen bulgulara göre eğimi eş değer MC parametreleri ile hesaplanan güvenlik sayısı $E-MC_{(FoS)} = 2,63$ iken $L-MC_{(FoS)}$ ve $HB-R_{(FoS)}$ değerleri bu değerden oldukça düşük mertebede hesaplanmaktadır (Şekil 7). Bu sonuçlara göre $m_i=20$ için yapılan analizlerde orijinal HB göçme modeli eğrisinin azaltılması (HB-R) ve lokal MC eğrisinin azaltılması (L-MC) neticesinde hesaplanan FoS değerleri eş değer MC ile hesaplanan değerlerden daha düşüktür. Ancak $m_i=2$ için yapılan analizlerde bu sonuçların tersi bir davranış elde edilmektedir.



Şekil 7. Farklı SRM analizleri sonucu hesaplanan çivi kuvvetleri, kayma düzlemleri ve FoS değerleri (GSI=5, $m_i=20$).

Tablo 3. Farklı SRM analizleri sonucu FoS değerleri.

Kayaç	E-MC	L-MC	HB-R
GSI=5, mi= 2	FoS=1,41	FoS=1,42	FoS=1,49
GSI=5, mi= 10	FoS=2,12	FoS=2,05	FoS=1,99
GSI=5, mi= 20	FoS=2,63	FoS=0,91	FoS=0,92

4. SONUÇLAR

Bildiri kapsamında ilk aşamada ayrıntılı olarak modellenen püskürtme beton kaplaması ve başlık plakası etkileşiminin şev stabilitesi üzerindeki etkisi araştırılmaktadır. Farklı şev açıları, yükseklikleri, çivi uzunlukları ve başlık plakası durumları için analizler yürütülmüştür. Güvenlik sayıları, kayma yüzeyleri, deformasyon miktarları ve çivilere gelen kuvvetler incelenmiştir.

- Püskürtme beton kaplamasının varlığı düşük eğim açılı şevlerde ($\alpha = 45^\circ$) güvenlik sayılarında ve kayma düzlemi şekillerinde bir değişiklik meydana getirmezken şev eğimi arttıkça ($\alpha = 60^\circ$ ve üzeri) hesaplanan güvenlik sayılarında ciddi bir artışa sebep olmaktadır.
- LEM ile yapılan stabilite analizlerinde elde edilen FoS değerlerinin kaplamasız durumda SRM ile hesaplanan FoS değerlerine daha yakın olduğu anlaşılmıştır. Şev eğiminin artması ($\alpha=90^\circ$) durumunda başlık plakasının varlığı güvenlik sayılarında ve çivi kuvvetlerinde artış meydana getirmekte, kayma düzlemi şekillerinde de değişim gözlemlenmektedir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, zemin çivileri kullanılarak güçlendirilmiş ayrışmış kaya şevlerin farklı mukavemet azaltma yaklaşımları ile analiz edilmeleri durumunda öncelikle güvenlik sayılarındaki farklılıklar araştırılmıştır. Sağlam kayanın mineralojik yapısı ve dane büyüklüğü gibi özelliklerine bağlı olarak değişen mi katsayısının artmasıyla yaklaşımlar arasındaki farkın da arttığı gözlemlenmektedir. Doğrusal olmayan orijinal HB kriteri (iii) ve lokal doğrusallaştırma (ii) yaklaşımları birbiri ile benzer sonuçlar göstermiş ancak eş değer MC parametreleri (i) ile elde edilen FoS değerlerinden daha düşük mertebelerde hesaplanmıştır. Bunun nedeni doğrusallaştırma yapılırken düşük normal gerilmelerde yüksek kayma mukavemeti değerlerinin elde edilmesidir. Kayma mukavemetindeki farklılıkların lokal olarak yapılan doğrusallaştırma ile azaltılabilir olduğu görülmektedir. SRM yaklaşımları arasındaki farklılıklar şev eğiminin artmasıyla daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Zemin çivili şevlerde kaya kütle özelliklerinin ve şev eğiminin değişmesi stabilite analizlerinde kullanılan SRM yöntemleri arasında güvenlik sayıları, kayma düzlemleri ve çivi kuvvetleri bakımından önemli ölçüde farklılıklar meydana getirmektedir. Bu durum zemin çivili şevlerde yürütülen stabilite analizlerinde güvensiz bir tasarım meydana getirebileceği gibi aşırı güvenli bir tasarım neticesinde de ekonomik olmayan çözümlere neden olabilir. Bu nedenle ayrışmış kaya kütlelerinde yapılan stabilite analizlerinde herhangi bir problemle karşılaşılması adına farklı SRM yöntemleri ile değerlendirilme yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Cai, F., & Ugai, K. (2000), Numerical analysis of the stability of a slope reinforced with piles, *Soils and foundations*, 40(1), 73–84.
- Chakraborti, S., Konietzky, H., & Walter, K. (2012), A Comparative Study of Different Approaches for Factor of Safety Calculations by Shear Strength Reduction Technique for Non-linear Hoek-Brown Failure Criterion, *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(4), 925–934, <https://doi.org/10.1007/s10706-012-9517-2>
- Code, P. (2005), Eurocode 2: design of concrete structures-part 1–1: general rules and rules for buildings, *British Standard Institution, London*.
- Das, B. M. (2007), *Fundamentos de engenharia geotécnica*, Thomson Learning São Paulo,
- Detournay, C., Varona, P., & Hart, R. D. (2011), *Factor of safety measure for Hoek-Brown material*.
- Duncan, J. M. (1996), State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes. *Journal of Geotechnical engineering*, 122(7), 577–596.
- Fu, W., & Liao, Y. (2010), Non-linear shear strength reduction technique in slope stability calculation, *Computers and Geotechnics*, 37(3), 288–298. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2009.11.002>
- Griffiths, D. V, & Lane, P. A. (1999), Slope stability analysis by finite elements, *Geotechnique*, 49(3), 387–403.
- Hammah, R. E., Yacoub, T. E., Corkum, B. C., & Curran, J. H. (2005), The shear strength reduction method for the generalized Hoek-Brown criterion, *American Rock Mechanics Association - 40th US Rock Mechanics Symposium, ALASKA ROCKS 2005: Rock Mechanics for Energy , Mineral and Infrastructure Development in the Northern Regions*.
- Hoek, E., Carranza, C., & Corkum, B. (2002), Hoek-brown failure criterion – 2002 edition, *Narms-Tac*, 267–273.
- Itasca, F. (2019), Fast Lagrangian analysis of continua in 3 dimensions, Tarihinde 08 Temmuz 2021, adresinden erişildi <http://docs.itascacg.com/flac3d700/contents.html#>
- Kim, Y., Lee, S., & Jeong, S. (2013), The effect of pressure-grouted soil nails on the stability of weathered soil slopes, *Computers and Geotechnics*, 49, 253–263. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.12.003>
- Kim, Y., Lee, S., Jeong, S., & Kim, J. (2013), *Computers and Geotechnics The effect of pressure-grouted soil nails on the stability of weathered soil slopes*, 49, 253–263.
- Li, A. J., Merifield, R. S., & Lyamin, A. V. (2008), *Stability charts for rock slopes based on the Hoek – Brown failure criterion*, 45, 689–700. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.08.010>
- Lin, P., Bathurst, R. J., & Liu, J. (2017), Statistical Evaluation of the FHWA Simplified Method and Modifications for Predicting Soil Nail Loads, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(3), 04016107. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001614](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001614)
- Marzionna, J. D., Maffei, C. E. M., Ferreira, A. A., & Caputo, A. N. (1998), Análise, projeto e execução de escavações e contenções, *Hachich, W., Falconi, FF, Saes, J. L.*
- Shen, J., & Karakus, M. (2014), Three-dimensional numerical analysis for rock slope stability using shear strength reduction method, *Canadian Geotechnical Journal*, 51(2), 164–172. <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0191>
- Terzaghi, K. (1943), *Theoretical soil mechanics*, johnwiley & sons. New York, 11–15.

- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967), *Soil mechanics in engineering practice*.
- Wei, W.-B., & Cheng, Y. M. (2008), *Three dimensional slope stability analysis and failure mechanism*.
- Wei, W. B., & Cheng, Y. M. (2010), Soil nailed slope by strength reduction and limit equilibrium methods, *Computers and Geotechnics*, 37(5), 602–618.
- Wei, W. B., Cheng, Y. M., & Li, L. (2009), Computers and Geotechnics Three-dimensional slope failure analysis by the strength reduction and limit equilibrium methods. *Computers and Geotechnics*, 36(1–2), 70–80.
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.03.003>
- Yuan, W., Bai, B., Li, X., & Wang, H. (2013), A strength reduction method based on double reduction parameters and its application, *Journal of Central South University*, 20(9), 2555–2562.
- ZHANG, L., Zheng, Y.-R., Zhao, S., & Shi, W. (2003), The feasibility study of strength-reduction method with FEM for calculating safety factors of soil slope stability, *Journal of Hydraulic Engineering*, 1(1), 21–26.
- Zienkiewicz, O. C., Humpheson, C., & Lewis, R. W. (1975), Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics, *Geotechnique*, 25(4), 671–689.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
c'_m	Mobilize olan kohezyon değeri	τ	Kayma gerilmesi
ϕ'_m	Mobilize olan içsel sürtünme açısı	σ_1	Büyük asal gerilme
c'_i	Lokal kohezyon değeri	σ_3	Küçük asal gerilme
ϕ'_i	Lokal içsel sürtünme açısı	ϕ'_{im}	Göçme anındaki Lokal içsel sürtünme açısı
c'_{im}	Göçme anındaki Lokal kohezyon	σ_{ci}	Bozunmamış kayacın tek eksenli basınç değeri