Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

KAYA KÜTLELERİNDE ORTOFOTO VERİLERİ İLE SÜREKSİZLİK KARAKTERİZASYONU VE RİSK ANALİZİ

DISCONTINUITY CHARACTERIZATION AND RISK ANALYSIS IN ROCK MASSES USING ORTHOPHOTO DATA

Bahadır BAŞDEMİRCİ[1], A. Anıl YUNATCI[2], Igor PESEVSKI[3], H. Tolga BİLGE[4], Eray ALTINCI[5], Kemal Önder ÇETİN[6]

ÖZET

Mekanik davranışın süreksizlikler tarafından kontrol edildiği kaya kütlelerinde, eklem yönelimi, eğim açısı, süreklilik ve arayüz özelliklerinin doğru karakterizasyonu, potansiyel instabilitelerin belirlenmesi ve risk temelli önlemlerin geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Süreksizlik veri setleri üzerinde gerçekleştirilen kinematik analizler, olası göçme türleri ile ilişkili baskın yönelimleri ortaya koymakla birlikte, gerçekçi blok boyutlandırması ancak süreksizliklerin sahadaki mekânsal dağılımının belirlenmesi ile mümkündür. Birden fazla süreksizlik seti ve yüksek kırık yoğunluğu içeren kaya kütlelerinde, geniş alanların karakterizasyonu açısından fotogrametrik yöntemler önemli avantajlar sunmaktadır. Bu çalışmada, Avrupa'da bulunan bir açık bakır madeni ocağına ait ön bulgular sunulmaktadır. Çalışmanın amacı, çok kademeli ölçekte yüzey deformasyonlarının gözlendiği ocakta mevcut stabilite durumunun değerlendirilmesi ve planlanan maden genişlemesi kapsamında güvenliğin incelenmesidir. Süreksizlik karakterizasyonu, örtüşen ortofoto verilerinden oluşturulan yüzey modeli kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, fiziksel özelliklerin doğru temsilini sağlamak amacıyla bir örtüşme düzeni önerilmiştir. Oluşturulan sayısal veri seti üzerinde yarı otomatik süreksizlik karakterizasyonu ve kinematik analizler gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu blok modelleme sürecinde karşılaşılan belirsizlikler ele alınmış ve kritik bölgeler için hızlı risk haritalama yaklaşımı geliştirilmiştir. Önerilen çalışma akışı, maden genişleme planlarının değerlendirilmesinde karar verme süreçlerini desteklemektedir.

Anahtar Kelimeler: *Blok analizi, Kinematik analiz, Açık ocak şev stabilitesi, Ortofoto verisine dayalı süreksizlik karakterizasyonu*

ABSTRACT

In rock masses where mechanical behavior is governed by discontinuities, accurate characterization of joint orientation, dip angle, persistence, and interface properties is essential for identifying instabilities and developing risk-based mitigation strategies. While kinematic analyses of discontinuity datasets indicate dominant orientations associated with potential failure modes, realistic block scaling requires mapping the spatial distribution of discontinuities in the field. In rock masses with multiple discontinuity sets and high fracture frequency, photogrammetric methods provide significant advantages for large-area characterization. This study presents preliminary findings from an open-pit copper mine in Europe, where multi-bench scale deformations have been observed. The objective is to assess slope stability and support safety evaluations for

[1] Jeoloji Mühendisi, GeoDestek Ltd. Şti., bbasdemirci@geodestek.com (Sorumlu yazar)
[2] Dr. İnşaat – Geoteknik Mühendisi, GeoDestek Ltd. Şti., ayunatci@geodestek.com
[3] Prof. Dr., Ss. Cyril and Methodius Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, pesevski@gf.ukim.edu.mk
[4] Dr. İnşaat – Geoteknik Mühendisi, GeoDestek Ltd. Şti., htbilge@geodestek.com
[5] İnşaat Yük. – Geoteknik Mühendisi, GeoDestek Ltd. Şti., ealtinci@geodestek.com
[6] Prof. Dr., Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, ocetin@metu.edu.tr

planned mine expansion. Discontinuity characterization was performed using a surface model generated from overlapping orthophoto data, with a proposed overlap pattern ensuring accurate representation of physical features. Semi-automated characterization of discontinuities and kinematic analyses were carried out using large datasets. Uncertainties in three-dimensional block modelling were addressed, and a rapid risk mapping approach for critical zones was developed. The proposed workflow supports geotechnical assessment and decision-making for mine expansion.
Keywords: *Block analysis, kinematic analysis, open-pit stability, orthophoto*

1. GİRİŞ

Mekanik davranışın süreksizlikler tarafından kontrol edildiği kaya kütlelerinde, şev stabilitesinin belirlenmesi, açık ocak maden işletmelerinin güvenli yürütülmesi açısından kritik bir gereklilik oluşturmaktadır. Potansiyel duraysızlık mekanizmalarının değerlendirilebilmesi için eklem yönelimi, eğim açısı, süreklilik ve arayüz özelliklerinin doğru biçimde karakterize edilmesi zorunludur. Süreksizlik veri setleri üzerinde gerçekleştirilen kinematik analizler, olası göçme türleri ile ilişkili baskın yönelimleri ortaya koymakla birlikte, gerçekçi blok boyutlandırması ancak süreksizliklerin sahadaki mekânsal dağılımının haritalanmasıyla mümkündür.

Aktif açık maden ocaklarında, özellikle yüksek ve dik şev yüzeylerinde, güvenli erişimin kısıtlı olduğu durumlarda geleneksel hat ölçümü yöntemlerinin uygulanabilirliği sınırlanmaktadır. Bu kısıtı aşmaya yönelik olarak fotogrametrik uzaktan algılama yöntemlerinin kullanımı son yıllarda kaya kütlesi karakterizasyonunda giderek yaygınlaşmaktadır (Sturzenegger ve Stead, 2009; Kemeny ve Turner, 2008). İnsansız hava araçları (İHA) ile elde edilen yüksek çözünürlüklü ortofoto görüntüleri, üç boyutlu yüzey modellerinin oluşturulmasına ve süreksizlik özelliklerinin bu modeller üzerinden otomatik veya yarı otomatik yöntemlerle ölçülmesine olanak tanımaktadır. Birden fazla süreksizlik seti ve yüksek kırık yoğunluğu içeren kaya kütlelerinde, geniş alanların karakterizasyonu açısından söz konusu yöntemler önemli avantajlar sunmaktadır (Ferrero vd., 2009).

Bu çalışmada, Avrupa'da bulunan bir açık bakır madeni ocağında uygulamaya geçirilen İHA tabanlı fotogrametrik veri toplama, üç boyutlu süreksizlik haritalama ve kinematik blok stabilitesi değerlendirmesini kapsayan bütünleşik bir analiz iş akışı sunulmaktadır. Çalışmanın amaçları; (i) mevcut kazı geometrisi altında yapısal jeoloji kontrollü yenilme türlerinin belirlenmesi, (ii) mevcut halinde ve planlanan kazılar sonrası olası blok yenilmelerinin mekânsal dağılımının haritalanması ve bir risk yönetim mekanizmasına altlık oluşturulması ve (iii) uzaktan algılama yoluyla elde edilen süreksizlik ölçümlerinin, seçilmiş parametrelerdeki belirsizliklere duyarlılığının olasılıksal yaklaşımla değerlendirilmesidir.

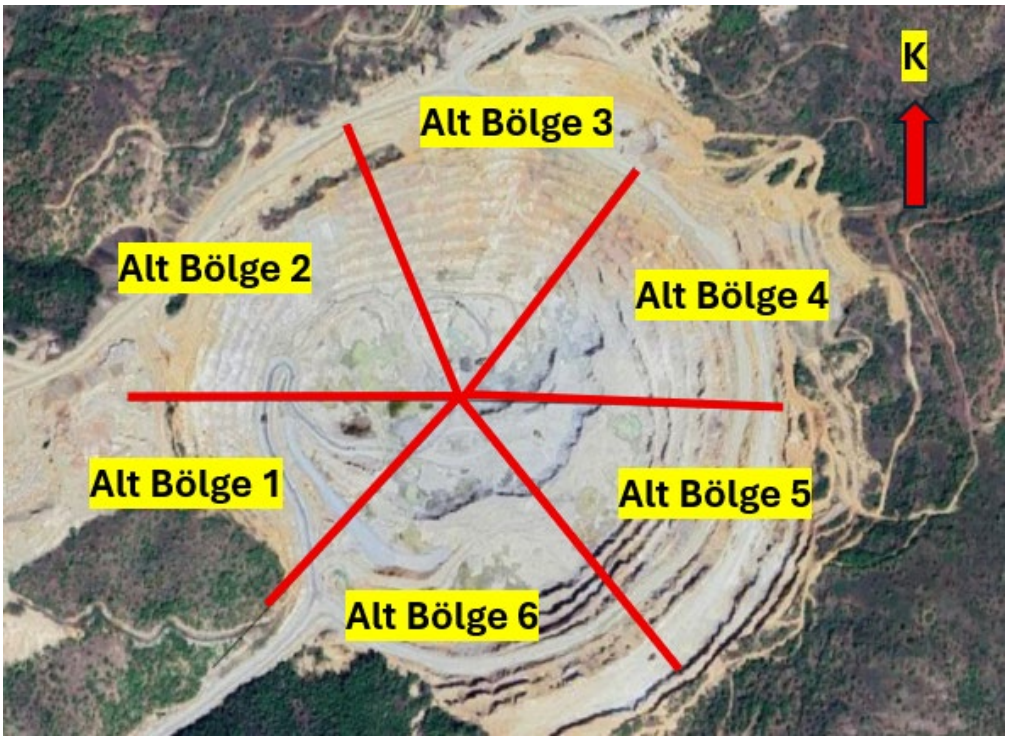
2. İNCELEME ALANI VE VERİ TOPLAMA ÇALIŞMALARI

Sahada farklı kademelerde yüzey deformasyonları gözlenmiş olup hem mevcut kazı geometrisinde şev stabilitesinin değerlendirilmesi hem de planlanan maden genişlemesi kapsamında güvenliğin irdelenmesi gereksinimi ortaya çıkmıştır.

Kaya kütlesi ve basamak geometrisi verileri, ocağın tamamını kapsayan bir İHA fotogrametrik ölçümünden elde edilmiştir. Uçuş düzenleme programı, uçuş parametreleri, görüntü örtüşme gereksinimleri ve kesit düzeni bu çalışmaya özel olarak oluşturulmuş, uçuşlar bu programa uygun şekilde yürütülmüştür. Elde edilen tüm görüntüler, fotogrametrik işleme ve üç boyutlu modelin oluşturulması için kullanılmıştır. Veri toplama programı, genel ocak topografyası ve ocak tabanının görüntülenmesine yönelik nadir grid

uçuşları ile seçilen basamaklardaki şev yüzeylerinin mümkün olduğunca yüzeye dik doğrultuda görüntülenmesini sağlamak amacıyla gerçekleştirilen eğik uçuşlardan oluşmaktadır. Görüntülerin ileri ve yanal eksenlerdeki örtüşme oranları sırasıyla en az %75 ve %70 olarak belirlenmiştir. Kullanılan İHA, RTK-GPS konumlama sistemiyle donatılmış olup her görüntü, çekim anındaki doğru konum bilgisini taşımaktadır. Bu sayede üç boyutlu model, kapsamlı bir yer kontrol noktası ağına gerek kalmaksızın doğrudan coğrafi olarak referanslanabilmiştir.

Proje sahasının boyutları (~550,000 m^2) uyarınca, tüm alanın tek bir modelle değerlendirilmesi uygun görülmemiş, mevcut geometrik koşullar, kazı durumu ve litolojik geçişler dikkate alınarak proje sahası Şekil 1'de gösterilen biçimde altı alt bölgeye ayrılmış, her alt bölge için ayrı bir model oluşturulmuştur. Uçuş programı sonrası, Alt Bölge 1 – 6 için elde edilen fotoğraf sayıları sırasıyla 1988, 1131, 1661, 1482, 1334 ve 1876'dır. Bu bildiride sadece Alt Bölge 1 için gerçekleştirilen analiz ve değerlendirmelere yer verilecektir.



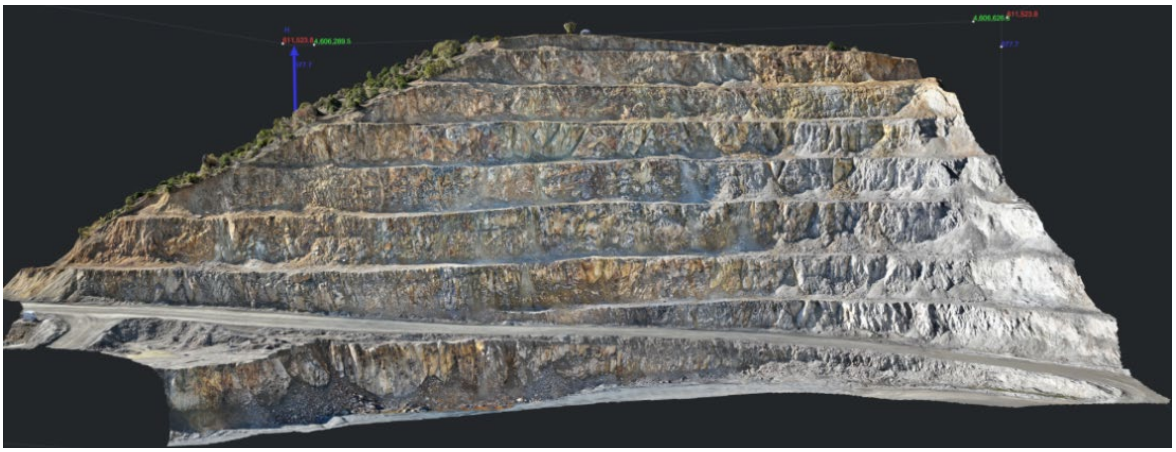
Şekil 1. Proje alanı alt bölgeleri

3. TÜMLEŞİK SAYISAL MODELLEME AKIŞI

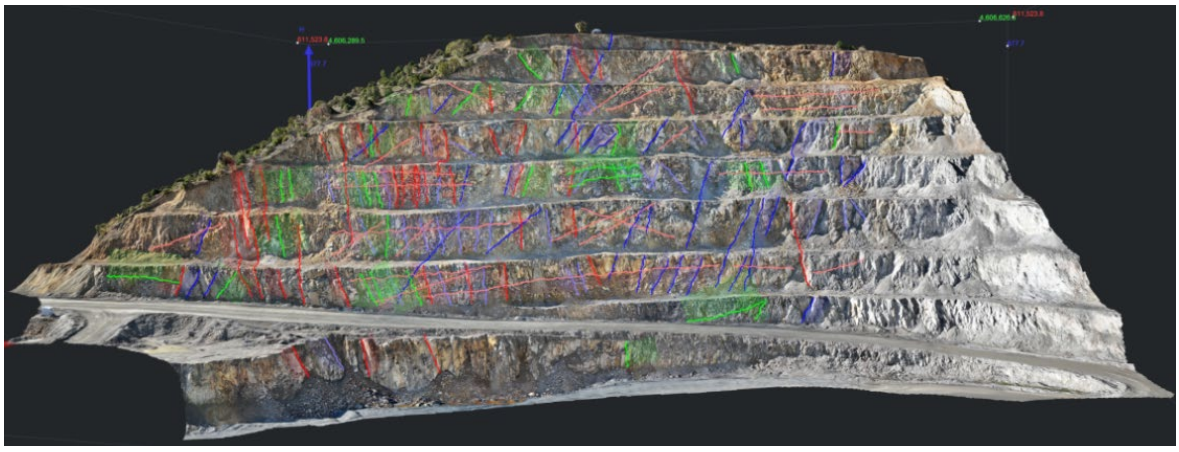
Sayısal modelleme çalışmaları, her biri farklı amaca yönelik üç ardışık aşamadan oluşan ve bunlara uygun sayısal araçların kullanıldığı bütünleşik bir iş akışı kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu iş akışında sırasıyla, Rocscience–3GSM ShapeMetriX yazılımı ile üç boyutlu fotogrametrik model oluşturularak süreksizlikler haritalanmış; Rocscience Dips yazılımı ile haritalanan süreksizlik popülasyonlarının stereonet projeksiyonu ve yönelim analizleri gerçekleştirilmiş; Rocscience RocSlope3 yazılımıylaysa üç boyutlu kinematik blok stabilitesi analizleri yapılmıştır. Her aşamadan elde edilen çıktılar bir sonraki aşamaya doğrudan aktarılarak, ham fotogrametrik veriden nicel kinematik blok stabilitesi değerlendirmesine uzanan bütünleşik bir analiz zinciri oluşturulmuştur.

3.1. Üç Boyutlu Model Oluşturma ve Süreksizlik Haritalama

ShapeMetriX, örtüşen görüntülerden üç boyutlu yüzey modeli oluşturulmasına ve bu model üzerinden süreksizliklerin temassız olarak haritalanmasına olanak sağlayan fotogrametri tabanlı bir yazılım platformudur. Süreksizliklere ait eğim, eğim yönü, iz uzunluğu, mekânsal konum ve süreklilik gibi temel geometrik özellikler model üzerinden belirlenebilmektedir. Proje sahasından alınan ortofotolar işlenerek altı alt bölge için ayrı ayrı üç boyutlu (3B) geometrik modeller oluşturulmuş, bildiride incelenen Alt Bölge 1'e ait model görünümüyse Şekil 2'de sunulmuştur. Süreksizlikler, 3B modellerde doğrudan tanımlanarak ölçülmüş, sahanın tamamında uzamsal referanslı bir yapısal veri seti elde edilmiştir (Şekil 3). Haritalanan süreksizlikler, gözlenen sürekliliklerine göre majör ve minör olmak üzere iki grupta sınıflandırılmıştır. İki veya daha fazla basamak yüksekliği boyunca süreklilik gösteren eklem düzlemleri, faylar ve makaslama zonları majör süreksizlik; tek bir basamak yüksekliğiyle sınırlı kalan veya daha kısa uzanım göstererek kaya kütlesindeki genel eklemlenme dokusunu temsil eden süreksizlikler ise minör süreksizlik olarak tanımlanmıştır.



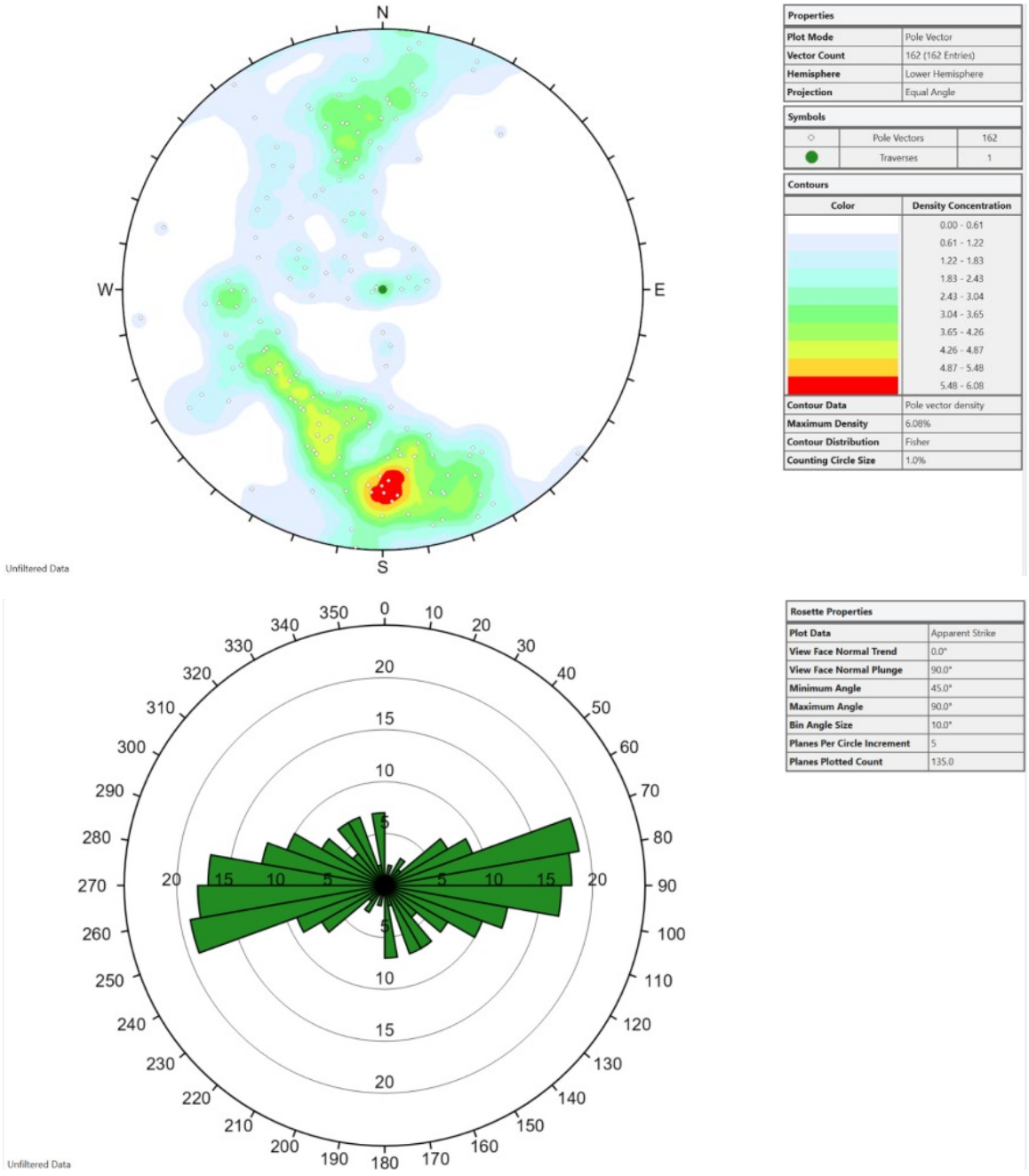
Şekil 2. ShapeMetriX üç boyutlu modeli — Alt Bölge 1



Şekil 3. Süreksizlik haritalama çıktısı — Alt Bölge 1

3.2. Stereonet Projeksiyon ve Yönelim Analizi

Dips, süreksizlik yönelimlerinin stereonet üzerinde değerlendirilmesine ve istatistiksel olarak baskın süreksizlik setlerinin belirlenmesine olanak sağlayan bir yönelim analizi yazılımıdır. Tanımlanan şev geometrileri için düzlemsel kayma, kama kayması ve devrilme mekanizmalarına yönelik kinematik değerlendirmeler de aynı ortamda gerçekleştirilebilmektedir. ShapeMetriX'te haritalanan minör süreksizlik popülasyonu Dips'e aktarılarak stereonet tabanlı yönelim analizine tabi tutulmuştur. Bu adımın amacı, majör elemanlar arasında belirlenenlerle kıyaslanabilir bir kinematik tehlike düzeyi oluşturabilecek, istatistiksel açıdan baskın yönelim kümelerinin varlığının araştırılmasıdır. Alt Bölge 1 için gerçekleştirilen analizlere ait bazı temsili stereonet görünümleri ve gül diyagramları Şekil 4'te sunulmaktadır.



Şekil 4. Stereonet grafikleri ve gül diyagramı — Alt Bölge 1

Gül diyagramları, haritalanan minör süreksizliklerin görünür doğrultu dağılımını, yalnızca dik eğimli elemanlar (eğim ≥ 45°) filtrelenerek göstermektedir. Tüm alt bölgelerde minör süreksizlikler genel olarak geniş bir doğrultu dağılımı sergilemekte; ocak şev geometrisi açısından belirgin biçimde yoğunlaşmış ve olumsuz yönelimli tek bir baskın set gözlemlenmemektedir. Alt Bölge 1'de K–KKD yönlü (yaklaşık 000°–020°) belirgin bir eğilim izlenmektedir ve bu, majör süreksizlik veri setine yansıyan sahanın genel yapısal dokusu ile tutarlıdır. Genel olarak, tüm alt bölgelerde minör süreksizlik popülasyonu içindeki doğrultu yönelimleri majör veri setiyle tutarlıdır; 3 boyutlu blok stabilite analizlerinde halihazırda çalışılanların dışında ek kritik yönelimli set tespit edilmemiştir.

Hakim süreksizlik setlerinin doğrultuları (70°–100°) ve yamaç yüzeyinin ortalama eğim yönü dikkate alındığında, bu setler tek başlarına belirgin bir blok oluşum riski taşımamaktadır. Bununla birlikte, yamaç yüzeyindeki diğer süreksizliklerin hakim setlerle oluşturduğu kesişimler ise düzlemsel ve kama tipi kayma potansiyeli oluşturmaktadır.

3.3. Üç Boyutlu Kinematik Blok Stabilitesi Analizi

Eklemli kaya şevlerinde yapısal kontrollü blok stabilitesinin değerlendirilmesi amacıyla, süreksizlik düzlemlerinin şev yüzeyleriyle kesişimleri üç boyutlu olarak incelenmiş ve geometrik olarak oluşması mümkün bloklar belirlenmiştir. Limit denge yöntemine dayalı analizlerde her bir blok için blok geometrisi ve ağırlığı, süreksizliklerin kesme mukavemeti ile mevcut veya öngörülen tahkimat elemanlarının etkileri dikkate alınmıştır. Analiz çerçevesi, gerekli olması halinde boşluk suyu basıncı ve sismik etkilerin de değerlendirmeye dahil edilmesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, inceleme alanında yeraltı su seviyesinin kazı kotları içerisinde gözlenmemesi ve mevcut drenaj sisteminin etkin çalıştığının raporlanması nedeniyle boşluk suyu basıncına ilişkin ilave bir boşluk suyu basıncı oranı (r_u) tanımlamasına ihtiyaç duyulmamış; benzer şekilde, saha depremselliği dikkate alındığında sismik etkiler bu çalışma açısından kritik bir analiz koşulu oluşturmamıştır.

Analizler sonucunda blokların duraylılığını ifade eden emniyet katsayıları hesaplanarak kritik bloklar belirlenmiştir. Kritik blokların yenilmesi durumunda, stabil olmayan blok modelden çıkarılarak analizler sistematik bir iterasyon süreci içerisinde tekrarlanmış ve böylece bloklar arasındaki etkileşimlerin rol oynadığı ilerleyici (progresif) yenilme mekanizmaları değerlendirilmiştir. Gerçek saha geometrisinin ve süreksizliklerin mekânsal konumlarının temsil edildiği model aracılığıyla, yapısal kontrollü duraysızlık mekanizmalarının ocak içerisindeki dağılımı ortaya konulabilmektedir. Böylece analiz sonuçları; basamak, ara rampa ve genel ocak ölçeğinde kritik bölgelerin belirlenmesi, kinematik risklerin değerlendirilmesi ve gerekli rehabilitasyon önlemlerinin geliştirilmesi amacıyla kullanılabilmektedir.

Çalışmada tanımlanan altı alt bölge, RocSlope3 yazılımı kullanılarak bağımsız olarak modellenmiştir. Komşu alt bölgeler arasındaki sınır zonları kritik süreksizlik kesişimleri açısından ayrıca incelenmiş; kinematik açıdan önem taşıyan kesişimlerin belirlendiği durumlarda ilgili sınır zonları birleştirilerek yeniden analiz edilmiştir. Majör ve minör süreksizliklerin her ikisi de RocSlope3 modellerine dahil edilmiş ve analizler mevcut kazı geometrisi için yürütülmüştür.

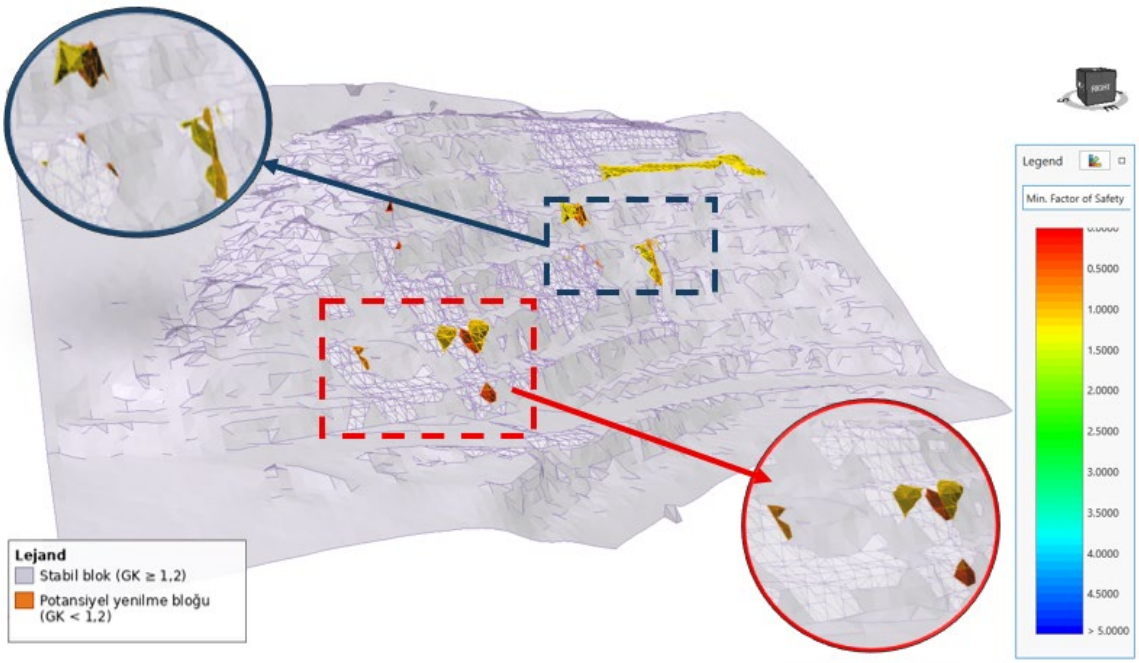
Tüm modelleme çalışmaları saha çalışmalarıyla eşgüdüm içerisinde gerçekleştirilerek arazi koşullarının modellerdeki temsil düzeyi gözetilmiştir. Metodolojinin temel unsurlarından biri, süreksizlik devamlılığının modelde ele alınış biçimidir. Fotogrametrik haritalamada

süreksizlikler yalnızca şev yüzeyinde açığa çıkan kısımlarıyla gözlenebildiğinden, gerçek uzamsal boyutlarının görünür sınırların ötesine uzanması mümkündür. Bu durumun analizlere yansıtılabilmesi amacıyla, haritalanan tüm süreksizliklerin eşdeğer yarıçapları (D) analiz öncesinde sistematik olarak ölçeklendirilmiştir.

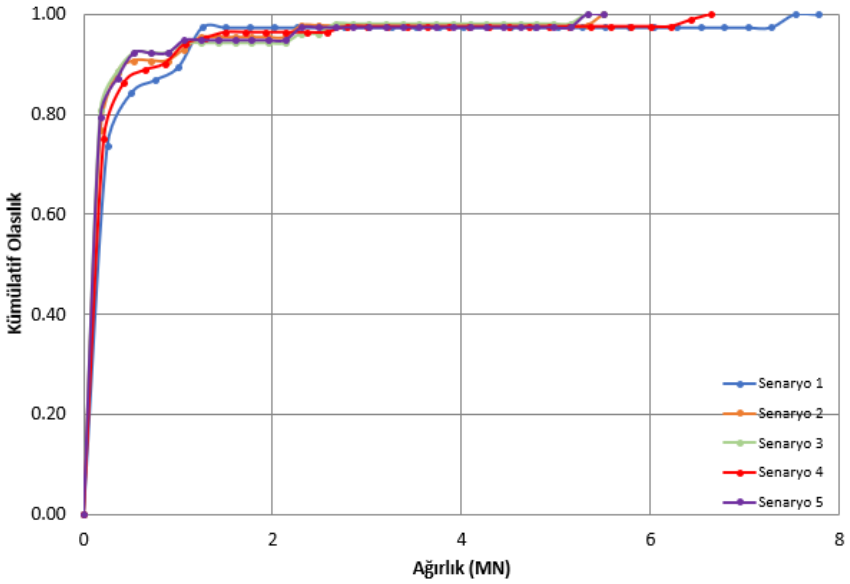
Fotogrametrik haritalamada süreksizlikler yalnızca şev yüzeyinde açığa çıkan kısımlarıyla ölçülebildiğinden, izlerden hesaplanan eşdeğer yarıçaplar gerçek süreksizlik boyutunu olduğundan küçük temsil etme eğilimindedir. Bu nedenle haritalanan tüm yarıçaplara bir ölçeklendirme katsayısı uygulanmıştır. Katsayının belirlenmesinde farklı değerler denenmiş, ölçeklendirilmiş süreksizliklerin şekil ve boyutlarının saha incelemeleri sırasında gözlenen süreksizlik geometrileriyle en uyumlu sonucu verdiği değer olarak 1.5 seçilmiştir. Temel referans durum için, uzaktan haritalama ile belirlenen tüm yarıçaplara bu nedenle sabit 1.5 ölçeklendirme katsayısı uygulanmıştır. Dolayısıyla bu değer doğrudan ölçülmüş bir büyüklük değil, saha gözlemlerine göre yapılan geometrik bir kalibrasyondur.

Haritalama sürecindeki epistemik ve rastgele belirsizliklere karşı, sonuçların duyarlılığını değerlendirmek ve uzaktan algılama ölçümlerinin temsil gücünü irdelemek üzere olasılıksal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, değişim katsayısı %10 olarak alınmıştır. Bu değer, saha gözlemleriyle uyumlu bulunan 1.5 katsayısı etrafındaki sınırlı bir belirsizliğin etkisini incelemek amacıyla mühendislik değerlendirmesi ile seçilmiş olup dağılımın genişliği, kalibre edilen geometriden fiziksel olarak gerçekçi olmayan sapmalar üretmeyecek şekilde seçilmiştir. Ölçeklendirilmiş her süreksizlik dairesinin çapı, %10 değişim katsayısına (CV) sahip normal bir dağılımın ortanca değeri olarak tanımlanmıştır. Her model çalışmasında, süreksizliklerin devamlılığındaki belirsizliğin üç boyutlu blok oluşumlarına etkisini değerlendirmek amacıyla, modeldeki her bir süreksizlik için bu dağılımdan bağımsız ve rastgele çap değerleri örneklenmiştir. Böylece her analiz için stokastik bir süreksizlik geometrisi oluşturulmuştur. Bu işlem her alt bölge için beş kez tekrarlanmıştır (Güvenlik katsayısı (GK) 1.2'den düşük olan blokların ağırlık dağılımlarının ardışık simülasyonlar boyunca önemli bir saçılım göstermediğinin belirlenmesi üzerine, senaryo sayısı beşle sınırlandırılmıştır). Elde edilen sonuçlar, tanımlanan belirsizlik sınırları içerisinde blok popülasyonunun tutarlı ve istikrarlı biçimde temsil edildiğini göstermektedir.

GK < 1.2 eşik değeri, potansiyel olarak kararsız blokların yanı sıra sınır stabilitesindeki blokların da değerlendirmeye dahil edilmesini sağlamak amacıyla raporlama kriteri olarak benimsenmiştir. Bu eşik; hem potansiyel olarak kararsız blokların (GK < 1.0) hem de süreksizlik özelliklerindeki değişimlere bağlı olarak yenilmeye yatkın, sınır stabilitesindeki blokların basamak veya birden fazla basamağı kapsayan ölçekte değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Temsili RocSlope3 analiz geometrisi ve blok stabilitesi sonuçları Şekil 5'te, beş stokastik senaryodan elde edilen GK < 1.2 blok ağırlığı dağılımları ise Şekil 6'da sunulmaktadır.



Şekil 5. RocSlope3 model geometrisi ve blok stabilitesi sonuçları — Alt Bölge 1



Şekil 6. GK < 1.2 blok ağırlığı dağılımları — beş stokastik senaryo — Alt Bölge 1

4. SONUÇLAR

Bu bildiri kapsamında, Avrupa'da bulunan bir açık bakır madeni ocağı için gerçekleştirilen İHA tabanlı fotogrametrik veri toplama, üç boyutlu süreksizlik haritalama ve kinematik blok stabilitesi değerlendirmesini kapsayan bütünleşik bir analiz yaklaşımının uygulamasına ilişkin sonuçlar sunulmuştur.

Proje sahasının genişliği, açık ocak şevlerinin geometrisi ve bazı şev yüzeylerine güvenli ve yeterli erişimin sınırlı olması nedeniyle, süreksizliklerin geleneksel saha yöntemleriyle gerekli kapsam ve ayrıntıda haritalanması pratik olarak mümkün görülmemiştir. Bu nedenle, geniş şev yüzeylerinin güvenli ve sistematik biçimde incelenmesine olanak

sağlayan İHA tabanlı fotogrametrik veri toplama yaklaşımı benimsenmiştir. Elde edilen üç boyutlu ve mekânsal olarak referanslı veri setinin süreksizlik karakterizasyonu ve blok stabilitesi analizlerinde doğrudan kullanılabilmesi sayesinde, saha genelindeki yapısal koşulların geniş ölçekte değerlendirilmesi ve kritik olabilecek blokların gerçek konumlarıyla birlikte incelenmesi mümkün olmuştur. Böylece, geleneksel haritalamanın uygulama güçlüğü taşıdığı açık ocak koşullarında veri toplama ile sayısal değerlendirme aşamalarını birbirine bağlayan uygulanabilir bir analiz yaklaşımı oluşturulmuştur.

Ocak genelinde belirlenen baskın kinematik yenilme mekanizması, kaya kütlesi içindeki süreksizlik düzlemlerinin kesişimiyle yönetilen kama kaymasıdır. GK < 1.2 olan bloklar incelenen tüm alt bölgelerde tespit edilmiş ve belirli bölgelerle sınırlı kalmayan bir mekânsal dağılım göstermiştir. Bu durum, yapısal kontrollü blok duraysızlıklarının yalnızca önceden belirlenen kritik kesimlerle sınırlandırılmaması ve planlanan kazılar öncesinde ilgili şev kesimlerinin alt bölge bazında değerlendirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Gerçekleştirilen olasılıksal analizlerde, GK < 1.2 olan blokların ağırlık dağılımlarının beş stokastik senaryo arasında belirgin bir saçılım göstermediği görülmüştür. Bu bulgu yalnızca kinematik tehlike örüntüsünün tanıtılan geometrik değişkenliğe karşı duyarsız olduğunu doğrulamakla kalmayıp, aynı zamanda fotogrametrik uzaktan algılama yoluyla elde edilen süreksizlik ölçümlerinin sahadaki yapısal koşulları temsil ettiğini gösteren kanıt niteliği de taşımaktadır.

ShapeMetriX ile gerçekleştirilen haritalama çalışmalarında benimsenen majör ve minör süreksizlik sınıflandırması, Dips yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen yönelim analizleri ile ayrıca değerlendirilmiştir. Minör süreksizlik popülasyonu içerisinde, majör veri setinde temsil edilenlerin dışında ilave ve belirgin bir kritik yapısal yönelim tespit edilmemiştir. Bu da kullanılan sınıflandırma yaklaşımını destekleyici kanıt olarak değerlendirilmiştir.

Çalışma kapsamında elde edilen üç boyutlu analiz sonuçları, kritik blokların yalnızca emniyet katsayıları bakımından değil, konumları ve boyutları açısından da değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Bu yönüyle kullanılan yaklaşımın, mevcut şev koşullarının değerlendirilmesinin yanı sıra planlanan kazılar öncesinde kritik bölgelerin belirlenmesi ve gerekli rehabilitasyon önlemlerinin geliştirilmesine yönelik mühendislik kararlarında kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

Değerlendirmeler mevcut kazı geometrisi ve yapısal veri seti için geçerli olup, yeni yapısal elemanlarla karşılaşılması veya şev geometrisinin önemli ölçüde değişmesi halinde ilgili kesimlerin güncel verilerle yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Ferrero, A.M., Forlani, G., Roncella, R. ve Voyat, H.I. (2009), "Advanced Geostructural Survey Methods Applied to Rock Mass Characterization", Rock Mechanics and Rock Engineering, 42, 631-665.

Kemeny, J. ve Turner, K. (2008), "Ground-Based LiDAR: Rock Slope Mapping and Assessment", FHWA-CFL/TD-08-006, Central Federal Lands Highway Division, Lakewood, Colorado.

Rocscience Inc. (2023), Dips 9 User Guide, Rocscience Inc., Toronto.

Rocscience Inc. (2023), RocSlope3 User Guide, Rocscience Inc., Toronto.

Sturzenegger, M. ve Stead, D. (2009), "Close-Range Terrestrial Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for Discontinuity Characterization on Rock Cuts", Engineering Geology, 106, 163-182.

3GSM GmbH (2023), ShapeMetriX Software Documentation, 3GSM GmbH, Graz.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	**Açıklama**	**Sembol**	**Açıklama**
GK	Güvenlik katsayısı	D	Süreksizlik daire yarıçapı (m)
CV	Değişim katsayısı	r_u	Boşluk suyu basıncı oranı