

CBS TABANLI 3B KAYA DÜŞMESİ ANALİZİ VE VERİ HAZIRLAMA SÜREÇLERİ: KAVAK KÖYÜ(SİVAS-TÜRKİYE) ÖRNEĞİ

Ali POLAT *

Alınma: 14.07.2020; düzeltme: 10.09.2020; kabul: 16.09.2020

Öz: Türkiye, bulunduğu coğrafi ve jeolojik konumundan dolayı doğal afetlerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Deprem, heyelan ve taşkından sonra en çok etkilenilen afet türü kaya düşmeleridir. Bu afet türünden korunmak için çeşitli önlem yöntemleri kullanılabilir. Bu yöntemlerin seçiminde ve projelendirilmesinde kaya düşmesi analizlerinin yapılması gerekmektedir. Rockyfor3D (RF3D) kaya düşmesi analizlerinde kullanılan başarılı bir yazılımdır. Ancak, veri hazırlama süreçleri çok karmaşıktır. CBS (Coğrafi Bilgi Sistemi) bilgisi gerektirir ve uzun zaman alır. Bu çalışmada, RF3D yazılımı için veri hazırlama süreçlerini otomatik olarak yapan bir araç oluşturulmuş ve kaya düşmesi analizleri yapılmıştır. Bu araç Python programlama dili ile oluşturulup ArcGIS yazılımına entegre edilmiştir. Bu çalışmanın uygulaması, Sivas il merkezinin batısında yer alan Kavak köyünde yapılmıştır. Düşmesi muhtemel kaya bloklarının kinetik enerji değerleri, zıplama yükseklikleri ve ulaşma mesafeleri gibi özellikleri başarıyla hesaplanmıştır. Bu sonuçlar kaya düşmesi önlem projelerinde, yer seçimi çalışmalarında, tehlike ve risk değerlendirme çalışmalarında kullanılabilir ve böylece karar vericiler tarafından daha doğru kararlar verilebilir.

Anahtar Kelimeler: Kaya düşmesi, İnsansız Hava Aracı (İHA), Python, RockyFor3D, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS)

GIS Based 3D Rockfall Analysis and Data Preparation Processes: Case of Kavak Village (Sivas-Turkey)

Abstract: Turkey is significantly affected by natural disasters due to its geographical and geological location. After the earthquake, landslide and flooding, the most adverse type of disaster is rockfall. A number of methods can be used to prevent this type of disaster. Rockfall analyzes should be carried out to select and project such mitigation methods. Rockyfor3D (RF3D) is a successful software used in rockfall analysis. However, data preparation processes are complicated. It requires GIS (Geographic Information System) knowledge and preparation processes take a long time. In this study, a tool was created to prepare data for Rockyfor3D (RF3D) software and rockfall analyses were executed. This tool was designed with Python scripting and integrated into ArcGIS. The proposed methodology was applied for the Kavak region in the west of Sivas city. Kinetic energy and bounce height values as well as runout distances of blocks that have tendency to fall were successfully calculated. The data preparation process required by the software was performed automatically and quickly using the tool prepared in this study. These results can be used in rockfall mitigation projects, site selection studies, hazard and risk assessment studies, and so, more accurate decisions can be made by decision-makers.

Keywords: Rockfall, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Python, RockyFor3D, Geographic Information System (GIS)

* İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü, 58050, Sivas
Ali Polat (ali.polat@afad.gov.tr)

1. GİRİŞ

Dünyanın birçok yerinde doğal afetler nedeniyle can ve mal kayıpları yaşanmakta olup büyük ölçekli ekonomik zararlar meydana gelmektedir. Bu doğal afetlerden bir tanesi de kaya düşmesi afetidir. Ülkemizde, deprem, heyelan ve taşkından sonra en çok etkilenilen afet türü kaya düşmeleridir (Gökçe ve diğ., 2008). Kaya düşmeleri, süreksizliklerle sınırlı olan kaya bloklarının kaynak bölgesinden çok hızlı bir şekilde eğim yönünde hareket ettiği bir tür yamaç duraysızlığıdır (Varnes, 1978; Hutchinson, 1988; Cruden ve Varnes, 1996). Olay esnasındaki yüksek hız nedeniyle, kaya düşmeleri blok boyutuna bağlı olarak güzergâhındaki yapılar için çok tehlikeli olabilir. Doğal afetler içerisinde küçük alanları etkileyen bir afet türü olmasına karşın sonuçları çok ciddi olabilir.

Kaya düşmeleri ile ilgili çalışmalar 19. yüzyıldan beri yapılmaktadır (Baltzer, 1875; Landolt, 1886; Lehman, 1933; Ritchie, 1963; Bozzolo ve Pamini, 1986). Bu çalışmalar 2000'li yıllardan itibaren artarak devam etmiştir (Erisman ve Abele, 2001; Guzzetti ve diğ., 2002; Crosta ve Agliardi, 2003; Schweigl ve diğ., 2003; Perret ve diğ., 2004; Dorren ve diğ., 2004; Ulusay ve diğ., 2006; Dorren ve diğ., 2006; Topal ve diğ., 2007; Frattini ve diğ., 2008; Tunusluoglu ve Zorlu, 2009; Park ve diğ., 2009; Youssef ve Maerz, 2009; Binal ve Ercanoglu, 2010; Volkwein ve diğ., 2011; Palma ve diğ., 2012; Arbanas ve diğ., 2012; Wang ve diğ., 2012; Keskin, 2013; Singh ve diğ., 2013; Youssef ve diğ., 2014; Ansari ve diğ., 2014a; Ansari ve diğ., 2014b; Youssef ve diğ., 2015; Kaya ve Topal, 2015; Polat ve diğ., 2016; Seçanj ve diğ., 2017; Polat ve Keskin, 2017; Saroglou ve diğ., 2018; Şener, 2019; Nasery ve Çelik, 2020).

Kaya düşmesi afetinden korunmak için çeşitli önlem yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler aktif ve pasif olarak ikiye ayrılır (Chen ve diğ., 2013). Aktif yöntem kaya düşmesi kaynak alanında yapılan sabitleme, destekleme gibi uygulamaları içerir. Pasif yöntem ise kaya bloğunun düşme güzergâhında uygulanabilecek çelik kaya bariyeri, toprakarme duvar ya da hendek açılması gibi uygulamalardır. Özellikle pasif uygulama yöntemlerini kullanabilmek için kaya düşmesi analizlerinin yapılarak çeşitli parametrelerin elde edilmesi gerekmektedir. Bu parametreler kullanılarak bölge için en uygun önlem yöntemi tasarlanabilir. Parametrelerin hesaplanması için bilgisayar destekli modeller geliştirilmiştir. Çeşitli yazılımlar kullanılarak kaya düşmeleri 2 boyutlu (2B) ve 3 boyutlu (3B) olarak modellenmektedir. Kaya düşmesi modellemesi için RockyFor3D (RF3D) (Dorren, 2012), RAMMS (Christen ve diğ., 2010), RotoMap (Scioldo, 1991), Colorado Kaya Düşmesi Simülasyon Programı (CRSP) (Jones ve diğ., 2000), RocPro3D (Barnichon, 2005) ve Rocfall (Rocscience, 1996) yazılımları kullanılmaktadır. RF3D kaya düşmelerini 3B olarak modelleyen bir yazılımdır. Bu yazılım ağaçların bariyer etkisini açık ve gerçekçi bir şekilde dikkate alan ilk modellerden biridir. RAMMS, doğal afetlerden çığ, moloz akması ve kaya düşmelerini ayrı ayrı modelleyen bir yazılımdır. ROTOMAP, kaya düşmesi analizi ve kaya düşmesi önlem sistemlerinin tasarımı için kullanılan üç boyutlu modelleme yapabilen bir yazılımdır. CRSP, kaya düşmesi davranışını modellemek ve herhangi bir bölgedeki olası kaya düşmesi olaylarının istatistiksel analizini yapmak için geliştirilmiştir. RocPro3D, modelleme için hem blok şekillerindeki değişiklikleri hem de zemin karakteristiklerindeki ve arazi yüzeyi düzensizliklerindeki değişimleri yansıtan olasılıklı bir yaklaşım kullanır. RocFall, kaya düşmesi riski altında olan yamaçların değerlendirilmesine yardımcı olmak için tasarlanmış bir 2B istatistiksel analiz programıdır.

Bu çalışmada kaya düşmesi analizleri için son zamanlarda sıklıkla tercih edilen, 3B modelleme yapabilen RF3D yazılımı kullanılmıştır (Netti ve diğ., 2016; Moos ve diğ., 2016; Şener, 2019; Žabota ve diğ., 2019; Francioni ve diğ., 2020). Yazılımın ihtiyaç duyduğu giriş parametreleri Python dilinde yazılan kodlar yardımıyla otomatik olarak oluşturulmuştur. İnceleme alanı olarak Sivas ili, Yıldızeli ilçesi, Kavak köyü seçilmiş olup yazılım, bu bölgedeki kaya düşmesi olayının analiz edilmesi için kullanılmıştır. Düşmesi muhtemel kaya bloklarının enerji miktarları, güzergâhları, zıplama yükseklikleri, ulaşacağı en uzak mesafe gibi parametreler elde edilmiş ve bu parametreler dikkate alınarak ekonomik, uygulanabilir ve sorunu ortadan kaldıracak uygun bir önlem projesi geliştirilmiştir.

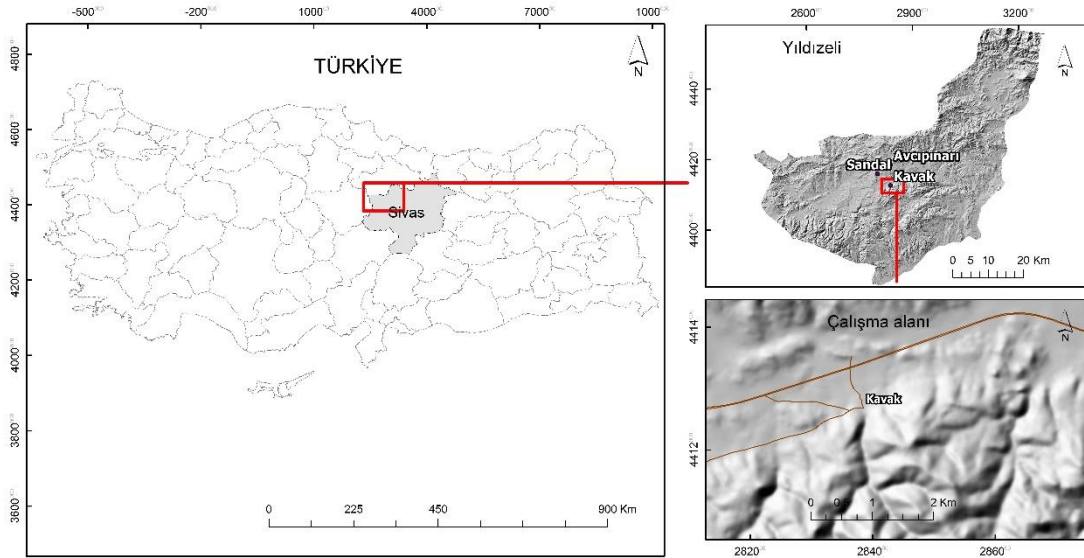
2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışma iki ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar verilerin elde edilmesi ve analiz aşamalarıdır. İhtiyaç duyulan veriler kullanılan bilgisayar yazılımlarına göre farklılık gösterebilmektedir. Bu çalışmada 3B analiz yapabilen RF3D yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılımın ihtiyaç duyduğu en temel parametre Sayısal Yüzey Modelidir (SYM). SYM verileri İnsansız Hava Aracı (İHA) kullanılarak elde edilmiştir. Aynı yöntemle elde edilen ortofoto görüntüleri, zemin tiplerinin ve kaya bloklarının tanımlanmasında kullanılmıştır.

Diğer girdi parametrelerinin hazırlanması için Python dilinde kod yazılarak ArcGIS yazılımına, veri hazırlama aracı olarak entegre edilmiştir. Bu araç yardımıyla veriler RF3D yazılımının ihtiyaç duyduğu şekil ve formatta otomatik olarak hazırlanmıştır. Veriler hazırlandıktan sonra RF3D ile analizler yapılmış olup düşmesi muhtemel kaya bloklarının kinetik enerji, zıplama yüksekliği, maksimum yuvarlanma mesafeleri vb. parametreleri elde edilmiştir.

2.1. Çalışma Alanı ve Kaya düşmesi Olayı

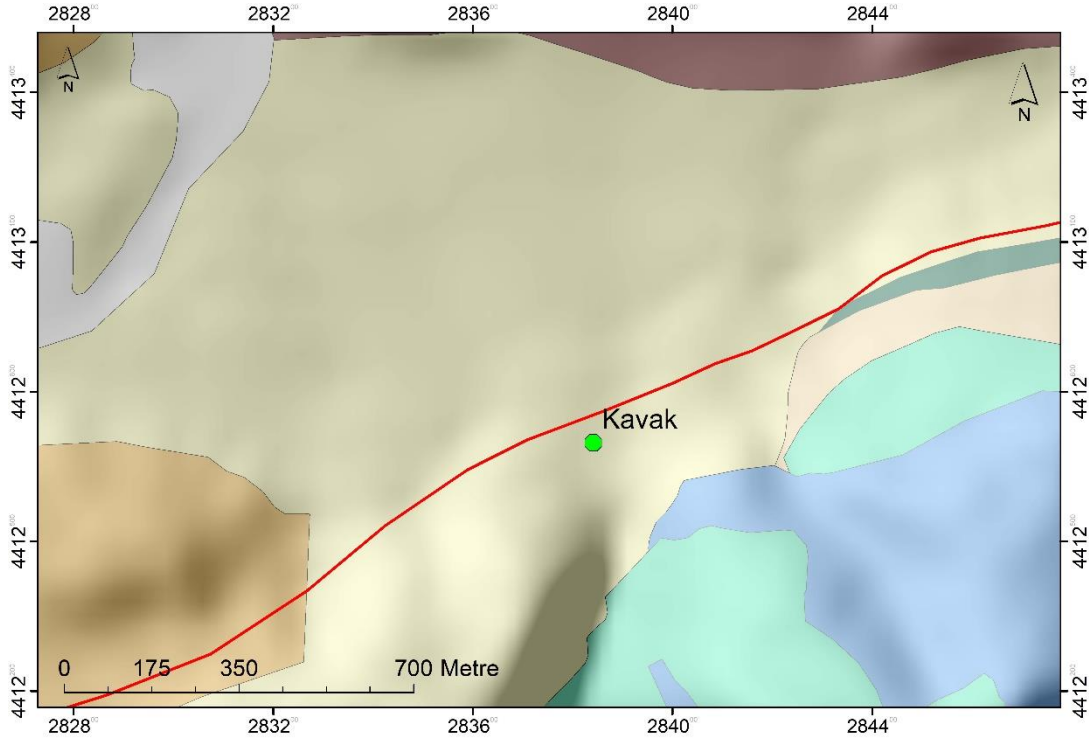
İnceleme alanı, Sivas ilinin kuzey batısında yer alan Yıldızeli ilçesine bağlı Kavak köyünde bulunmaktadır. Kavak köyü Sivas şehir merkezine 60 km, Yıldızeli ilçesine 13 km uzaklıktadır (Şekil 1). Kavak köyü yerleşim alanı, MTA'nın (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü) 1/25000 ölçekli jeoloji haritasında (Akbaş ve diğ., 1991) Orta Eosen yaşlı kumtaşı-çamurtaşı birimleri ile temsil edilmektedir (Şekil 2). Jeolojik birim olarak temelde Orta Kambriyen yaşlı kireçtaşları bulunur. Kaya düşmelerinin bulunduğu alan (Kaynak alan) Paleozoyik-Mezozoyik yaşlı mermer-gneys ve şist tipi birimlerden oluşur. Köyün kuzeyinde Paleosen yaşlı bazalt-andezit ve piroklastik kayalar vardır. Doğuda, daha az bir alanda Eosen çakıltaşı-kumtaşı-çamurtaşı birimleri vardır. En genç birim olan alüvyonlar ise köyün kuzey batısında yer alır.



Şekil 1:
İnceleme alanının yer bulduru haritası

Bu çalışmada Yıldızeli ilçesi bağlı Kavak köyünün güney doğu yamaçlarında meydana gelebilecek muhtemel kaya düşmesi olayı incelenmiştir. Kaya düşmesi kaynak alanı Paleozoyik-Mezozoyik yaşlı mermerlerden oluşmaktadır. Bu birimler bölgedeki tektonik olaylardan dolayı bol kırıklı ve çatlaklı bir yapı sunmaktadır. Kendi içerisinde küçük ölçekli faylanmalar da

gözlenmiştir. Bu kırıklı ve çatlaklı yapı, ani sıcaklık değişimleri, şiddetli kar ve yağmur yağışı, donma-çözülme, deprem ve insan kaynaklı nedenler bölgedeki kaya düşmesi riskini artırmaktadır. Kayalık alanın güney kısımlarında süreksizlikler daha fazla gözlenmekte olup bu bölgede yakın zamanda düşen kaya bloklarının olduğu gözlenmiştir (Şekil 3). Şekil 3'te düşmüş iki adet kaya bloğu (B bloğunun düşmeden önceki ve düştükten sonraki konumu) gözlenmektedir. C bloğu B bloğundan daha önce düşmüş bir kayadır. B bloğu A bloğunun bir parçası iken koparak düşmüş ve yamaç aşağı yaklaşık 20 m kaymıştır. Düşen blokların hacimleri C için yaklaşık 9 m³ ve B bloğu için ise 35 m³ ölçülmüştür. İnceleme alanının kuzey kısımlarında da düşmüş bloklar gözlenmiş ancak boyutlarının güney kesimdekilere oranla daha az olduğu tespit edilmiştir. 0,1-1 m³ hacmindeki kaya blokları yamaç eteklerinde gözlenebilmektedir. Daha önceki yıllarda özellikle bu kayalardan korunmak için hendek açılmış olup bu hendeğin ise zamanla dolduğu, kenar kısımlarının ise aşındığı görülmüştür. İnceleme alanın güneyinde bulunan kaya bloklarının boyutu çok daha büyük olup daha büyük risk oluşturmaktadır. 2016 yılında, yaklaşık 9 m³ hacmindeki kaya bloğu bir iş makinesinin üzerine düşmüş ve kullanılamaz hale getirmiştir. 2017 yılında ise 35 m³ lük bir kaya bloğu ana kayadan koparak düşmüştür.



Açıklamalar

- | | |
|--|---|
| ● yerleşim yeri | PIROKLASTİK KAYA, PALEOSEN |
| — fay | BAZALT-ANDEZİT-PIROKLASTİK KAYA, PALEOSEN |
| Litoloji | MERMER, PALEOZOYİK-MEZOZOYİK |
| ALÜVYON, KUVATERNER | GNAYS-MİKASİST, PALEOZOYİK-MEZOZOYİK |
| KUMTASI-ÇAMURTASI, ORTA EOSEN | KIREÇTASI, ORTA KAMBRIYEN |
| ÇAKILTASI-KUMTASI-ÇAMURTASI, EOSEN | |

Şekil 2:

İnceleme alanı ve çevresinin jeoloji haritası (1/25000 ölçekli jeoloji haritası, MTA)



Şekil 3:

Düşmüş kaya blokları. (1) B bloğunun düşmeden önceki konumu. (2) B bloğunun düştükten sonraki konumu

2.2. Veri Hazırla Süreçleri

Bu çalışmada SYM ve ortofoto verilerinin elde edilmesinde İHA kullanılmıştır. 3B kaya düşmesi analizlerinin temel ihtiyacı olan SYM verileri, İHA sayesinde elde edilen görüntülerin işlenmesi ile oluşturulmuştur. RF3D yazılımının ihtiyaç duyduğu diğer girdi parametreleri ise yazılan kodlar sayesinde otomatik olarak oluşturulmuştur.

2.2.1. İnsansız Hava Aracı (İHA) Çalışmaları

Teknolojinin ilerlemesi ile meydana gelen gelişmeler birçok alanda, zaman ve emek sarfiyatını en aza indirmektedir. Son dönemlerde kullanılan İHA'lar yardımıyla ekonomik, hızlı ve hassas haritacılık işlemleri yapılabilmektedir. Birçok CBS analizinde altlık olarak kullanılan yüksek çözünürlüklü SYM verileri İHA yardımıyla çekilen görüntülerin işlenmesi sonucu elde edilebilmektedir. Bu çalışmada “DJI Phantom 3 Pro” model bir İHA kullanılmıştır (Şekil 4).

İHA ile görüntü alım işi Pix4d Capture yazılımı ile otomatik olarak yapılmıştır. Önce uçuş yapılacak alan belirlenmiş, daha sonra görüntü alımı için gerekli parametreler girilmiştir. Bu parametreler aşağıdaki gibi seçilmiştir;

Uçuş yüksekliği (altitude):100 m.

Uçuş hızı (speed): Hızlı

Kamera açısı (Angle): 70°

Bindirme oranı (Overlap): %80

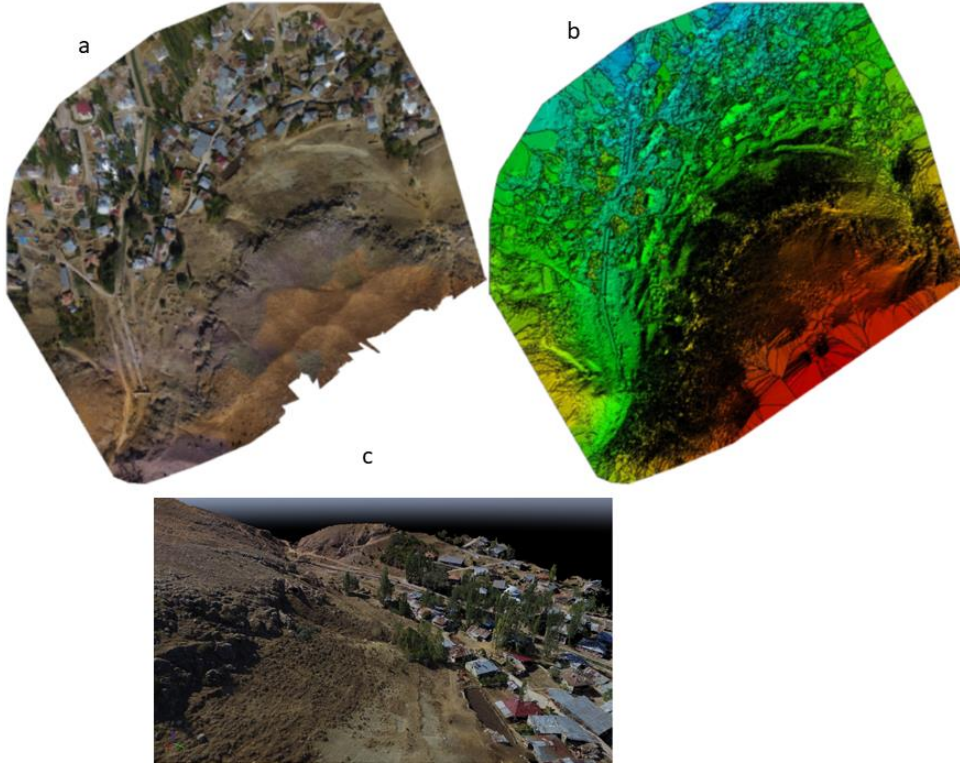
Bakış (Face): Merkez

Uçuş “Double Grid” yöntemi ile yapılmış olup tek bir yönde değil, gidiş-geliş ve bu yönde dik yönde gidiş-geliş yapılarak görüntü alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan İHA modelinin engel tanımı özelliği bulunmamaktadır. Her hangi bir kazaya sebep vermemek için uçuş yüksekliği belirlenirken dikkat edilmesi gerekir. Yükseklik için referans değer, İHA'nın harekete başladığı nokta olduğu için civardaki baz istasyonları, elektrik hatları, yüksek binalar, ağaçlar ve tepeler belirlenerek uygun yükseklik değeri seçilmelidir.



Şekil 4:
Kullanılan İHA ve özellikleri

Kullanılan kamera modeli FC00X, çözünürlük 4000x3000, odak uzaklığı 3,61 mm ve piksel boyutları 1,56 x 1,56 μm 'dir. Yapılan uçuş ile 175 adet görüntü elde edilmiş olup bu görüntüler Pix4Dmapper yazılımı ile işlenmiştir. Yazılım ile nokta bulutu (12330335 adet nokta), 3,38 cm/piksel çözünürlüklü ortofoto ve 6,76 cm/piksel çözünürlüklü SYM görüntüleri elde edilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5:
Yüksek çözünürlüklü ortofoto (a), SYM (b) ve nokta bulutu (c) görüntüsü

2.2.2. RF3D İçin Veri Hazırlama Aracının Oluşturulması

Bu çalışmada kaya düşmesi modellemesi için, 3 boyutlu modelleme yapabilen RF3D yazılımı kullanılmıştır. Sonuçları gayet başarılı olan bu yazılımın girdi parametrelerinin oluşturulması çok zaman almaktadır. Bu yazılım, girdi parametresi olarak en az 10 adet asc formatında harita dosyasına ihtiyaç duymaktadır. Bunlar aşağıda kısaca açıklanmıştır. Ayrıntılı bilgi için yazılımın kullanım kılavuzuna bakınız (Dorren 2016).

1. dem.asc: İstenilen en temel veri, arazinin topoğrafyasındaki değişimleri gösteren SYM verisidir. LİDAR görüntüleri daha doğru sonuçlar verir. Bu çalışmada yazılımın girdi parametresi olarak 0,3 m. x 0,3 m. çözünürlüğe sahip SYM verileri kullanılmıştır. Yazılım SYM verilerinden yararlanarak eğim ve bakı verileri üretmektedir.

2. rockdensity.asc: Bu raster harita, kaya kaynak alanlarının veya blokların yoğunluğunu göstermektedir. Bu değerler 0, 2000-3300 arasında olabilir ve kg.m^{-3} birimini kabul eder. Eğer değer 0 ise kaynak hücre olarak kabul edilmez ve analize girmez.

3. d1.asc, 4. d2.asc, 5. d3.asc: Bu üç raster harita kaya bloklarının boyutlarını temsil eder. Blok yüksekliği d1 ile blok genişliği d2 ile ve blok uzunluğu d3 ile temsil edilir.

6. blshape.asc: Bu harita ise düşebilecek kaya bloklarının şeklini temsil eder. Dört çeşit kaya bloğu şekli tanımlanmıştır. Bunlar; 0 (Şekilsiz ya da kaynak kaya olarak tanımlanmamış), 1 (Kare şekilli), 2 (Elipsoid şekilli), 3 (Küre şekilli), 4 (Disk şekilli).

7. rg70.asc, 8. rg20.asc, 9. rg10.asc: Bu üç parametre dosyası yamaç yüzeyi pürüzlülüğü olarak tanımlanmaktadır. Değerleri 0 m. ile 100 m. arasında değişir. Rg70 yamacın %70'inde, rg20 yamacın %20'sinde ve rg10 yamacın %10'unda gözlenen pürüzlülüğü göstermektedir. Ancak pürüzlülükten kast edilen aslında arazideki mikro topoğrafya değil kaya bloklarının güzergâhında karşılaşılabileceği engellerdir. Örneğin asfalt yol için bu değerler sıfır kabul edilirken (Engel ya da engebe yok) bir nehir ya da içi su dolu kanal için 100 seçilebilir (Kayacın enerjisinin sönmülmesinden dolayı).

10. soiltype.asc: Bu parametre kısmen yeraltı özelliklerine göre zemin sınıflarıdır. Bloğun çarpma anındaki karşılaştığı zemini tanımlar. Zeminin çarpma anındaki davranışını tespit edebilmek için çekiçle bir miktar kazılarak bakılması tavsiye edilir. Yazılım tarafından tanımlanmış zemin tiplerinden birini seçmek gerekir.

Veri hazırlama kodları Python 2.7 sürümü ile yazılmıştır. Yazılan kodlar ArcGIS yazılımına entegre edilerek kullanıcı dostu bir araç oluşturulmuştur. Bu aracın girdi parametreleri, çalışma klasörü (Sonuçların kayıt edildiği dizin), SYM dosyası, kaya bloklarının bulunduğu dosya, zemin tiplerinin bulunduğu dosya, kayaç birim hacim ağırlığı hücre boyutu ve varsa kaya bariyeri dosyasıdır (Tablo 1).

RF3D yazılımının kullandığı parametreler her hangi bir CBS yazılımı sayesinde elle hazırlanabilir. Parametre haritalarının çözünürlüğünün, satır ve sütun sayılarının aynı olması gerekmektedir. Birinci parametre olan SYM (dem.asc) İHA sayesinde çekilen görüntülerin fotogrametrik yöntemlerle işlenmesi sonucu elde edilmiştir. İkinci parametre olan kaya birim hacim ağırlığı arazideki kaya birimine göre belirlenir. İnceleme alanındaki kaya blokları için ortalama birim hacim ağırlığı 2700 kg.m^{-3} olarak kullanılmıştır. d1.asc, d2.asc, d3.asc, blshape.asc, rg70.asc, rg20.asc, rg10.asc parametreleri Python dilinde yazılan kodlar sayesinde otomatik olarak hesaplanmış ve haritaları oluşturulmuştur. Sonuncu parametre olan zemin tipi parametresi (soiltype.asc) arazi gözlemleri yardımıyla ortofotolar üzerinde poligon tipinde oluşturulmuştur.

Zemin tipi seçiminde yazılımın kullanma kılavuzunda yer alan zemin tiplerinden yararlanılmıştır. Zemin tipi yüzeyi temsil etmemektedir. Aslında bu seçim yapılırken yeraltı verileri dikkate alınır (Dorren 2016). Zemin tipi seçiminde kullanılacak parametreler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Veri hazırlama aracı girdi parametreleri

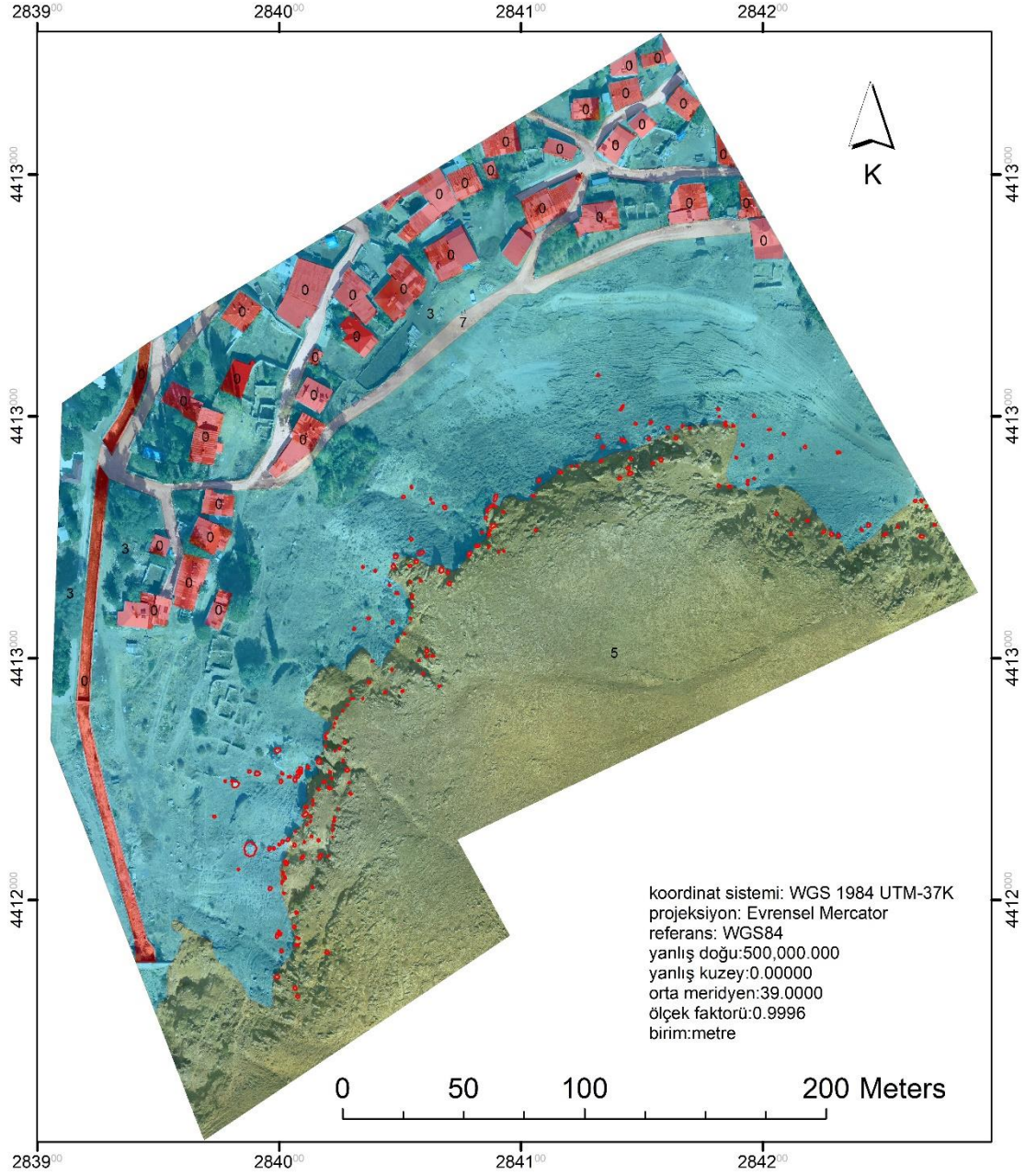
| Girdi parametreleri | Açıklama |
|---------------------|--|
| Çalışma klasörü | Hazırlanan verilerin kaydedileceği dizin |
| SYM | Sayısal yüzey modeli. İHA ile elde edilen görüntülerden oluşturulmuş 3 boyut verisi (Raster formatta) |
| Zemin tipleri | Herhangi bir CBS yazılımında araziye tanımlayacak şekilde, poligon tipinde oluşturulmuş dosya (shp formatında) |
| Kayalar | Ortofoto üzerinde düşmesi muhtemel kaya blokları veya kaynak alanları gösterir dosya (shp formatında) |
| Yoğunluk | Arazideki kaya bloklarının birim hacim ağırlığı (Kg.m^{-3}) |
| Hücre boyutu | Analizde kullanılacak çözünürlük (örnek 0,5 m) |
| Bariyer | İstenirse, çizgi tipinde bariyer dosyası hazırlanarak analizde kullanılabilir. Zorunlu değildir |

Tablo 2. Analiz için seçilebilecek zemin tipleri (Dorren 2016)

| Zemin tipi | Genel tanımlama | Ortalama Rn değeri | Rn Değer aralığı |
|------------|---|--------------------|------------------|
| 0 | Irmak, bataklık veya kaya bloğunun nüfuz edebileceği malzeme | 0 | 0 |
| 1 | İnce toprak malzemesi (derinlik > ~ 100 cm) | 0,23 | 0,21 – 0,25 |
| 2 | İnce toprak malzemesi (derinlik <~ 100 cm) veya kum / çakıl karışımı | 0,28 | 0,25 – 0,31 |
| 3 | Yamaç molozu ($\emptyset < \sim 10$ cm), küçük kaya parçaları içeren orta derecede kompakt zemin veya orman yolu | 0,33 | 0,30 – 0,36 |
| 4 | Yamaç molozu ($\emptyset > \sim 10$ cm) veya büyük kaya parçalarına sahip kompakt zemin | 0,38 | 0,34 – 0,42 |
| 5 | İnce toprak veya bozunmuş malzeme içeren anakaya | 0,43 | 0,39 – 0,47 |
| 6 | Anakaya | 0,53 | 0,48 – 0,58 |
| 7 | Asfalt yol | 0,35 | 0,32 – 0,39 |

Bu çalışma için, analiz yapılacak alanda 4 tip zemin tanımlaması yapılmıştır (Şekil 6). Bu tanımlama, ana kayanın bulunduğu alan için 6, yamaç eteğinde bulunan daha az eğimli yerler için 3, bölgede bulunan kanal için 0 ve yollar için 7 olarak yapılmıştır. Bu veriler RF3D yazılımının kullanım kılavuzunda verilmiş tablo ve görüntülere göre seçilmektedir. Bu kılavuzda 8 adet zemin tipi için genel tanımlamalar yapılmıştır. Arazi gözlemleri ile bu zemin tipleri karşılaştırılarak çalışma alanı için en uygun zemin tipinin seçilmesi gerekir. Zemin tipi verisi Rn değerlerini içerir. Rn normal çarpma (geri tepme) katsayısıdır. Bu değer analiz sonuçlarını direk olarak etkilemektedir. Bu yüzden iyi bir gözlem yapılarak uygun zemin tiplerinin seçilmesi önemlidir. Bu seçim yapılırken litolojiden ziyade kayanın hareketine etki edebilecek yüzeyler dikkate alınmalıdır. Bölgede bulunan kanalın kayalar için engel teşkil edeceği düşünülmüş ve zemin tipi 0 olarak tanımlanmıştır. RF3D yazılımı zemin tipine göre tanımlanmış ortalama Rn değerleri kullanır. Kullanıcının kendi Rn ve Rt değerlerini kullanmasına izin vermez.

Rt değeri de tanjantsal çarpma (geri verme) katsayısı denilen, Rn değeri gibi kayaların sıçradıktan sonraki hızlarını hesaplamaya yarayan bir parametredir. Bu parametre yüzey pürüzlülüğü verileri kullanılarak hesaplanmaktadır.



Açıklamalar



Şekil 6:

Analizde kullanılacak zemin tipleri ve düşmesi muhtemel kaya blokları (Zemin tipi tanımları için Tablo 4'e bakınız)

RF3D'nin gerekli parametrelerinden birisi de yüzey pürüzlülüğü ya da yüzey engebese denilen bu verilerdir. Bu veriler rg70, rg20 ve rg10 isimli raster dosyalarına kaydedilmektedir. Rg70 yamacın %70'indeki, rg20 yamacın %20'sindeki ve rg10 yamacın %10'undaki pürüzlülüğü

temsil eder. Belirlenmesi ve raster haritalarının oluşturulması karmaşık bir parametredir. Bu haritalar da kendi yazılımımız sayesinde otomatik olarak hazırlanmıştır. Zemin tipi 0 olan poligonlar için bu değerler 100 olarak alınmıştır. İrmak, bataklık veya kayacın enerjisini tamamıyla sönmüleyebilecek ortamlar için bu değer 100 alınması, kaya bloğunun yuvarlanma güzergâhında engel teşkil edecek bir malzeme yoksa 0 olarak kabul edilmesi önerilir.

Bu çalışma ile hazırlanan araç tarafından hesaplanan ilk parametre yamaç yüzey pürüzlülüğüdür (rg70, rg20, rg10). Üç ayrı dosya olarak hazırlanması gerekmektedir. Bu parametrenin hesaplanması için yüksek çözünürlüklü SYM verileri kullanılmıştır. SYM verilerinden ortalama ve maksimum yükseklik değerleri hesaplanmıştır. Her bir hücre için maksimum değerlerden ortalama değerler çıkarılarak yeni bir raster harita oluşturulmuştur. Bu harita yüzey pürüzlülüğü (YP) haritası olarak kullanılmıştır.

$$YP = SYM_{max} - SYM_{ort} \quad (1)$$

Bu formülde YP: yüzey Pürüzlülüğü, SYMmax: Maksimum SYM değerleri, SYMort: Ortalama SYM değerleridir. YP haritası kullanım kılavuzunda verilen değerler kullanılarak yeniden sınıflandırılmıştır. Bu sınıflar:1.sınıf: 0 cm.-10 cm., 2.sınıf: 10 cm.-50 cm., 3.sınıf: 50 cm.-1m., 4.sınıf: 1 m.-2,5 m., 5.sınıf: 2,5 m.-10m., 6.sınıf:10m.-100m.

Sınıflandırılan harita değerlerinin yüzde oranları her bir zemin tipi için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu oranlardan yararlanarak poligonun %70, %20 ve %10'luk kısmına karşılık gelen yükseklik değerleri hesaplanmıştır. Bu yükseklik değerleri yazılımın istediği aralıklara dönüştürülmüştür (Tablo 3).

Tablo 3. Yüzey pürüzlülüğü ve olası rg değerleri (Dorren 2016)

| Yüzey pürüzlülüğü sınıfları | Olası Rg değerleri |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| Pürüzlülük 0, engel yok | 0 |
| 1: 0 – 10 cm | 0,03; 0,05; 0,08; 0,1 |
| 2: 10 –50 cm | 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,5 |
| 3: 50 cm – 1 m | 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1 |
| 4: 1 – 2,5 m | 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 2; 2,5 |
| 5: 2,5 – 10 m | 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10 |
| 6: > 10 m | 100 |

Örneğin rg70 değeri 0,045 m. olarak hesaplandı ise bu değer 0,05 m. ye dönüştürülmüştür. İnceleme alanında 4 adet farklı bölge için rg değerleri hesaplanmış ve 4 farklı dosya olarak kaydedilmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. Zemin tipleri ve yüzey pürüzlülüğü değerleri

| Zemin tipi | Rg 70 | Rg 20 | Rg 10 |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|
| 0 (Su kanalı, Konutlar) | 100 | 100 | 100 |
| 3 (Killi, Marnlı Kumtaşı, Çamurtaşı) | 0,05 | 0,2 | 0,2 |
| 6 (Anakaya-Mermer) | 0,05 | 0,15 | 0,15 |
| 7 (Yol) | 0,03 | 0,2 | 0,2 |

Veri hazırlama aracı ile hesaplanan diğer bir parametre blok şeklindedir. SYM verileri, blok şeklinin hesaplanması için de kullanılmıştır. Şeklin hesaplanması için kayanın boyutlarından yararlanılmıştır. Blokların en ve boylarının tespit edilmesinde ArcGIS yazılımının minimum sınır geometrisi özelliğinden faydalanılmıştır. Her bir blok için SYM değerlerinin minimum ve ortalamaları elde edilmiş, ortalama yükseklik değerlerinden minimum yükseklik değerleri çıkarılarak bloklarının yükseklikleri bulunmuştur.

$$h = SYM_{ort} - SYM_{min} \quad (2)$$

Bu formülde h: kaya bloğu yüksekliği, SYM_{ort}: Ortalama SYM değerleri, SYM_{min}: Minimum SYM değerleridir.

Blok şekilleri aşağıda verilen fonksiyonlar ile hesaplanmıştır.

Disk Şekilli bloklar:

```
def disk(a,b,c):
    array=[a,b,c]
    tmin=min(array)
    x=a/3
    y=b/3
    z=c/3
    if (tmin==a and tmin<y and tmin<z):
        return 4
    elif (tmin==b and tmin<x and tmin<z):
        return 4
    elif (tmin==c and tmin<x and tmin<y):
        return 4
    else:
        return 0
```

Bu fonksiyonda a,b,c: Blok boyutları (a=Yükseklik, b=en, c=boy), tmin: en küçük blok boyutu, 4: Disk şeklini, 0 ise şeklin belirlenmediğini temsil etmektedir.

Bu fonksiyon ile boyutlar kontrol edilerek disk şekline uygun ise blshape. asc dosyasına 4 yazılır (Yazılımda 4, disk şekilli blokları temsil etmektedir. Eğer şekil disk şekline uygun değilse 0 yazılır ve analize devam edilir.)

Küre Şekilli bloklar:

```
def kure(bs, eb, he, yog):
    if (bs==0 and eb>=0,8 and he>=0,8 and yog>=0,07):
        return 3
    else:
        return bs
```

Bu fonksiyonda bs: Blok şekli, eb: en/boy, he: yükseklik/en, yog: şekil yoğunluğu = Alan/Çevre², 3: Küre şekilli blok.

Fonksiyon ile blok şekli kontrol edilir. Eğer hesaplanmamışsa (bs=0 ise) diğer parametreleri kullanarak küre olup olmadığı kontrol edilir. Buradaki değerler deneme yanılma ile hesaplanmış ve arazi verileri ile kontrol edildikten sonra en uygun eb>=0,8, he>=0,8 ve yog>=0,07 olacak şekilde kullanılmıştır. Fonksiyonda kayacın şekline küre olarak karar verilemezse kayaç şekli dosyasına 0 yazılmaktadır.

Elips ve Dikdörtgen Şekilli bloklar:

Elips ve dikdörtgen şekilleri sadece boyutlarına (en, boy, yükseklik) bakılarak ayırt edilemez. Bu yüzden farklı parametreler kullanılmıştır. Blok şeklinin elips veya dikdörtgen olduğuna karar vermek için aşağıdaki yazılan kod satırı kullanılmıştır.

```
if(ao<=0,8 and yog>=0,065 and he<=0,9 and eb<=0,9 and bs!=4 and bs!=3):  
    bs=2  
if(bs<2):  
    bs=1
```

Bu satırda ao: alan oranı=Gerçek alan/Minumum bounding geometri ile hesaplanan alan, yog: yoğunluk, he: yükseklik/en, eb: en/boy, bs: blok şekli, 1:dikdörtgen, 2: elips.

Blok şekli elips ya da dikdörtgenden farklı ise, diğer parametrelere bakılır ve elips olup olmadığına karar verilir. Şeklin elips olduğuna karar verilirse şekil dosyasına 2 (Elips 2 ile temsil edilir) değilse 1 (1 Dikdörtgen şeklini temsil eder) yazılır. Böylece kaya bloğunun boyutları ve şekilleri otomatik olarak tespit edilmiş, d1.asc,d2.asc,d3.asc ve blshape. asc dosyaları hazırlanmıştır.

3. BULGULAR

Kaya düşmesi analizlerinde kullanılacak yazılımın ihtiyaç duyduğu parametreler bu çalışma ile hazırlanan araç sayesinde oluşturulmuştur. Arazi gözlemleri ve CBS çalışmaları ile zemin tipleri ve düşebilecek kaya blokları belirlenmiştir.

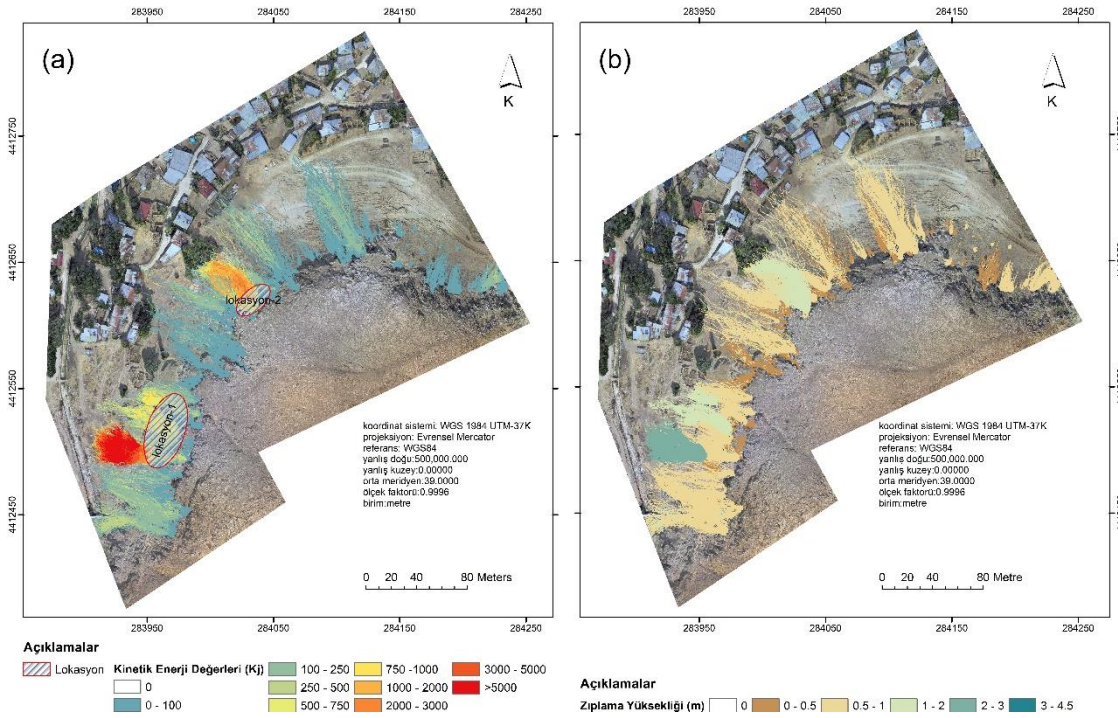
Kaynak alan olarak seçilen bölgenin dışında, yamaçta bulunan, önceden düşmüş kaya blokları da düşmesi muhtemel olarak değerlendirilmiştir. Eğimin fazla olması, iklimsel koşullar gibi diğer tetikleyici nedenlerden dolayı blokların düşebileceği varsayılmış ve analize dâhil edilmiştir. Analiz tek bir kaya bloğu için yapılabileceği gibi birden fazla blok için de yapılabilir. İnceleme alanında toplam 211 adet blok çizilmiştir. Bu blokların boyutları ve şekilleri otomatik olarak hesaplanmıştır. İnceleme alanında 125 adet dikdörtgen şekilli, 56 adet elipsoid şekilli, 25 adet disk şekilli ve 5 adet küre şekilli bloğun olduğu tespit edilmiştir.

Verilerin hazırlanma aşamaları tamamlandıktan sonra kaya düşmesi analizleri yapılmıştır. Hazırlanan verilerin bulunduğu dizin RF3D yazılımına çalışma dizini olarak tanıtılmıştır. Kaya bloklarının hacimleri için +/- %5 oranında değişim olabileceği kabul edilmiştir. Başlangıç yüksekliği 0,5 metre olarak kabul edilmiş ve analiz yapılmıştır. RF3D yazılımı ile düşmesi muhtemel kayaların kinetik enerji dağılımı, zıplama yükseklikleri, her bir hücreden geçen blok sayısı, her bir hücreden geçen blokların kaynak sayısı, ulaşma mesafeleri, her bir hücrede duran blok sayısı, enerji çizgisi açısı, ulaşma zamanı ve maksimum hızları hesaplanabilir.

RF3D yazılımı ile on adet simülasyon yapılmıştır. Yukarıda belirtilen çıktılar otomatik olarak oluşturulmaktadır. Yazılım enerji dağılımı ve zıplama yükseklikleri için istatistiksel sonuçlar da vermektedir. %50-90-95-98-99 güven aralığında verilen bu sonuçlardan %95 güven aralığındaki değerlerin kullanılması tavsiye edilmektedir. Ortalama kinetik enerji ve zıplama yükseklikleri de hesaplanmaktadır. Bu çalışmada kinetik enerji dağılımları için %95 güven aralığındaki değerler, zıplama yükseklikleri için ise ortalama değerler kullanılmıştır (Şekil 7a). Analizde elde edilen maksimum kinetik enerji değerleri 20000 Kj'ün üstündedir. Enerji dağılımına bakıldığında bloklarının enerjilerinin çoğunlukla 100-250 Kj arasında olduğu görülmektedir. Orta kesimde ve güney batıda bazı bloklarda enerjilerin 3000-5000 Kj ve daha fazla olduğu gözlenmektedir. Burada enerjinin yüksek çıkması blok boyutlarının büyük olması ile ilişkilidir. Şekil 7a'da kinetik enerjilerin yüksek olduğu alanlar işaretlenmiştir. İnceleme alanının lokasyon-1 ile gösterilen kesiminde daha önceden meydana gelmiş kaya düşmesi olayları vardır. Şekil-3'te gösterilen kaya blokları bu alanda yer almaktadır. Bol kırıklı ve çatlaklı, büyük ölçekli kaya bloklarının yer aldığı bu alanda kaya düşmesi potansiyelinin yüksek olduğu yazılım

ile doğrulanmıştır. Bir diğer alan lokasyon-2 ile gösterilen alandır. Bu bölgede küçük ölçekli bir kuru dere bulunduğundan düşen blokların burada yoğunlaştığı ve enerjisinin arttığı arazi gözlemleri ile de tespit edilmiştir. Dere içerisinde ve daha alt kesimlerde daha önce düşmüş kaya blokları gözlenmektedir.

Önlem yöntemleri seçilirken dikkat edilmesi gereken diğer bir parametre blokların zıplama yükseklikleridir. İnceleme alanında kayaçların zıplama yüksekliğini artıracak bir ortam bulunmamaktadır. Ana kayadan kopan bloklar enerji sönümlenme kapasitesi daha yüksek bir zeminle karşılaştıkları için çok yüksek değerler gözlenmemektedir. Şekil 7b’de blokların zıplama yükseklikleri dağılımı gösterilmektedir. Zıplama yükseklikleri 5 grupta değerlendirilmiştir. Blokların çoğunun zıplama yüksekliği değerleri 0,5 – 1 metre arasındadır. Maksimum zıplama yüksekliği ise 4,5 metre olarak hesaplanmıştır.



Şekil:7

Düşmesi muhtemel kaya bloklarının (a) kinetik enerji değerleri, (b) zıplama yükseklikleri

4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Sivas ili, Yıldızeli ilçesi, Kavak köyünün doğusunda yer alan, dik bir yamaç eteğinde kaya düşme potansiyelinin yüksek olduğu görülmüştür. İnceleme alanında önceki yıllarda düşmüş kaya blokları gözlenmektedir. Köyün batı yamacında bulunan birimler Paleozoyik - Mesozoyik yaşlı mermerlerden oluşmaktadır. Bu bölge kaya düşmesi kaynak alanı olarak belirlenmiştir. Kırık ve çatlaklı, kısmen bozunmuş bu birimler bol miktarda süreksizlik içermektedir. Bölgedeki kaya yapısı ve topoğrafya kaya düşmesi riskini artırmaktadır.

Bu çalışmada inceleme alanında bulunan düşmesi muhtemel kaya bloklarının 3B modellemesi yapılmıştır. Modelleme yazılımı olarak RF3D yazılımı tercih edilmiştir. Genel olarak, kaya düşmesi analizlerinden elde edilen sonuçların kalitesi, kullanılan girdi parametreleri ile doğrudan ilişkilidir. Bu yüzden parametrelerin hazırlanması esnasında hata yapılmaması önem arz etmektedir. Yazılımın ihtiyaç duyduğu girdi parametrelerinin hazırlanması CBS bilgisi gerektirir. İstenen parametrelerin hazırlanması uzun zaman almaktadır. Bazı parametreler ise

karmaşık işlemler ile oluşturulur ve hata yapma olasılığı yüksektir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için Python dilinde otomatik veri hazırlama aracı oluşturulmuş ve ArcGIS yazılımına entegre edilmiştir. Oluşturulan bu aracın ihtiyaç duyduğu parametreler SYM, zemin tipleri ve kaya bloklarını içeren dosyalardır. Ayrıca bariyer dosyası hazırlanmış ise girdi parametresi olarak kullanılabilir ancak zorunlu değildir. Bir diğer girdi parametresi tam sayı olarak istenen kayaç birim hacim ağırlığıdır. Bütün modelleme yazılımlarının ihtiyaç duyduğu bir parametre olan SYM verileri İHA sayesinde elde edilmiştir. Aynı şekilde fotogrametrik yöntemler ile bölgenin ortofotosu da oluşturulmuştur. Zemin tipleri arazi gözlemlerine dayanarak ortofoto üzerinde poligon tipinde hazırlanmıştır. Düşmesi muhtemel kaya blokları ortofoto üzerinde poligon tipinde oluşturulmuştur. Bu çalışma ile oluşturulan araç, girdi parametrelerini kullanarak bloklarının yüksekliğini, enini, boyunu ve şeklini otomatik hesaplayabilmektedir. Ayrıca analizde kullanılacak alanın Rg70, Rg20, Rg10 değerleri de otomatik olarak hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu veriler RF3D yazılımının istediği formata dönüştürülerek bir dizin içerisine kayıt edilir.

Veriler hazırlandıktan sonra düşmesi muhtemel kaya blokları 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Modelleme sonucu blokların kinetik enerji dağılımı, zıplama yükseklikleri, her bir hücreden geçen blok sayısı, her bir hücreden geçen blokların kaynak sayısı, ulaşma mesafeleri, her bir hücrede duran blok sayısı, enerji çizgisi açısı, ulaşma zamanı ve maksimum hızları hesaplanmıştır.

Bu çalışma ile iki ana problemin çözümü hedeflenmiştir. Bunlardan biri, kaya düşmesi riski bulunan bir bölge için 3 boyutlu kaya düşmesi analizi yaparak karar vericilere uygun veriler sunabilmektir. Bu amaca yönelik RF3D yazılımı kullanılmış ve Kavak köyünde bulunan riskli bloklar için kaya düşmesi analizi yapılmıştır.

Bir diğeri ise bu yazılımın giriş parametrelerinin hazırlanmasını kolaylaştırmak ve hızlandırmaktır. Girdi parametrelerinin hazırlanması karmaşık ve zaman alıcı işlemlerden oluşur. Analiz sonuçlarının kalitesi girdi parametrelerine göre değişim gösterir. Özellikle blokların hacmi, geometrisi ve çarpma katsayıları sonuçları direkt etkiler. Bu parametreler İHA ile çekilen görüntülerden oluşturulan çok hassas SYM verileri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu çalışma ile parametrelerin hazırlanması sırasında karşılaşılan sorunlar ortadan kaldırılmış, ihtiyaç duyulan parametrelerin hazırlanması işi otomatik olarak yapılmıştır. Hazırlanan Python kodları ve ArcGIS aracına <https://github.com/apolat2018/rf3d> adresinden ulaşılabilir. Gelecek çalışmalarda özellikle yapay zeka kullanılarak blokların şekilleri ve boyutları için daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilir. Görüntü işleme tekniğindeki gelişmeler sayesinde kaya blokları otomatik olarak tanınabilir ve mobil uygulamalar ile yerinde analizler yapılabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma esnasında sağlanan destek ve yardımları için Sivas İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğüne teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

1. Akbaş, B., Akdeniz, N., Aksay, A., Altun, İ., Balcı, V., Bilginer, E., Bilgiç, T., Duru, M., Ercan, T., Gedik, Günay, Y., Güven, İ.H., Hakyemez, H.Y., Konak, N., Papak, İ., Pehlivan Ş., Sevin, M., Şenel, M., Tarhan, N., Turhan, N., Türkecan, A., Ulu, Ü., Uğuz, M.F., Yurtsever, A. ve diğerleri. (1991) *Türkiye jeoloji haritası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayını*, Ankara, Türkiye.
2. Baltzer, A. (1875) Über einen neuen felssturz am roßberg, nebst einigen allgemeinen bemerkungen über derartige erscheinungen in den alpen, Neues Jahrbuch f. Min. Geol. u. Pal. p. 15-26.

3. Barnichon, J.D. (2005) http://www.rocpro3d.com/rocpro3d_en.php (Erişim Tarihi: 19.12.2018).
4. Binal, A. ve Ercanoglu, M. (2010) Assessment of rockfall potential in the Kula (Manisa, Turkey) Geopark Region, *Environmental Earth Sciences*, v.61, pp.1361-1373. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0454-1>
5. Bozzolo, D. ve Pamini, R. (1986) Simulation of rock falls down a valley side, *Acta Mechanica* 63, p. 113-130. <https://doi.org/10.1007/BF01182543>
6. Chen, YC., Li, JK. ve Ran, LG. (2013) A review of rockfall control measures along highway, In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 353, pp. 2385-2391). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.353-356.2385>
7. Christen, M., Kowalski, J., & Bartelt, P. (2010). RAMMS: numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain, *Cold Regions Science and Technology*, 63(1-2), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.04.005>
8. Crosta, GB. ve Agliardi, F. (2003) A methodology for physically based rockfall hazard assessment, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3(5):407–422. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-407-2003>
9. Cruden D.M. ve Varnes, D.J. (1996) Landslide types and processes. Landslides investigation and mitigation, Special Report 247, In: *Turner, A.K. and Schuster, R.L.* (eds.), 36–75 pp.
10. Dorren, LKA., Maier, B., Putters, US. and Seijmonsbergen, AC. (2004) Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps, *Geomorphology* 57:151–167. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(03\)00100-4](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00100-4)
11. Dorren, L. K. A., Berger, F., and Putters, U. S. (2006) Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, 145–153. <https://doi.org/10.5194/nhess-6-145-2006>
12. Dorren, L.K.A. (2016) Rockyfor3D (v5.2) revealed – transparent description of the complete 3D rockfall model. ecorisQ paper (www.ecorisq.org): 33 p.
13. Erismann, T.H. ve Abele, G. (2001) Dynamics of rockslides and rockfalls, *Springer-Verlag*, Berlin Heidelberg, 316p.
14. Francioni, M., Antonaci, F., Sciarra, N., Robiati, C., Coggan, J., Stead, D., & Calamita, F. (2020) Application of Unmanned Aerial Vehicle Data and Discrete Fracture Network Models for Improved Rockfall Simulations, *Remote Sensing*, 12(12), 2053. <https://doi.org/10.3390/rs12122053>
15. Frattini, P., Crosta, G., Carrara, A. and Agliardi, F. (2008) Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physicallybased approaches *Geomorphology* 94(3–4):419–437. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.037>
16. Gökçe, O., Özden, Ş., Demir, A. (2008) Türkiye’de afetlerin mekansal ve istatistiksel dağılımı afet bilgileri envanteri, *Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Afet Etüt ve Hasar Tespit Daire Başkanlığı*, Ankara, 126s.
17. Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R. and Agliardi, F. (2002) Stone: a computer program for the three-dimensional simulation of rockfalls, *Computers and Geosciences*, 28:1079–1093. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00025-0](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00025-0)

18. Hutchinson, J.N. (1988) Morphological and geotechnical parameters of landslide in relation to geology and hydrogeology, in: *5th international symposium on landslides*, Lausanne, edited by: Bonnard, C., A.A. Balkema, 3–35. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(89\)90310-0](https://doi.org/10.1016/0148-9062(89)90310-0)
19. Jones, C. L., Higgins, J. D., & Andrew, R. D. (2000) Colorado Rockfall Simulation Program Version 4.0 User's Manual: Colorado Department of Transportation. Denver, Colorado, United States of America, 3-47.
20. Kaya, Y. and Topal, T. (2015) Evaluation of rock slope stability for a touristic coastal area near Kusadasi, Aydin (Turkey), *Environmental Earth Sciences*, 74, 4187–4199. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4473-9>
21. Keskin, I. (2013) Evaluation of rock falls in an urban area: The case of Boğaziçi (Erzincan/Turkey), *Environmental Earth Sciences*, v.70, pp.1619-1628. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2247-9>.
22. Landolt, E. (1886) Die bäche, schneelawinen und steinschläge und die mittel zur vermindering der schädigungen durch dieselben. Zürich, *Orell Füssli & Co.* <https://doi.org/10.3931/e-rara-21003>
23. Lehmann, O. (1933) Morphologische theorie der verwitterung von steinschlagwänden. *Vierteljahrschrift Nat, forsch Ges, Zürich* 87, p. 83–126.
24. Moos, C., Toe, D., Bourrier, F., Knüsel, S., Stoffel, M., & Dorren, L. (2019). Assessing the effect of invasive tree species on rockfall risk–The case of *Ailanthus altissima*, *Ecological Engineering*, 131, 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.03.001>
25. Nasery, M., Çelik, M. (2020) Kaya Islahı Çalışmalarında Birleşik Çözümlerin İncelenmesi: Trabzon Kaymaklı Örneği, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering* , 25 (1) , 539-554 . <https://doi.org/10.17482/uumfd.680226>
26. Netti, T., Castelli, M., De Biagi, V. (2016) Effect of the Number of Simulations on the Accuracy of a Rockfall Analysis, *Procedia Engineering*.158, 464–469. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.473>
27. Palma, B., Parise, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F. (2012) Rockfall hazard assessment along a road in the Sorrento Peninsula Campania southern Italy, *Natural Hazards*, v.61, pp.187-201. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9899-0>
28. Polat, A., Keskin, I., Denizli, I. (2016) Preventing and analysis of falling rocks: a case of sarica village (Gürün, Turkey), *Journal of the Geological Society of India*, 88, 763–772. <https://doi.org/10.1007/s12594-016-0544-0>
29. Polat A. ve Keskin, I. (2017) Kaya düşmesi çalışmalarında insansız hava aracı kullanımı ve cbs tabanlı 3D analiz. 70, *Türkiye Jeoloji Kurultayı*, 2017, Ankara.
30. Ritchie, A.M. (1963) Evaluation of rockfall and its control. Highw. Res. Board - NRC, Washington DC, *Highway Research Record* 17, p. 13–28.
31. Rocscience, (1996) <https://www.rocscience.com/software/rockfall>. (Erişim Tarihi: 19.12.2018).
32. Saroglou, C., Asteriou, P., Zekkos, D., Tsiambaos, G., Clark, M. and Manousakis, J. (2018) UAV-based mapping, back analysis and trajectory modeling of a coseismic rockfall in Lefkada island, Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 321–333. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-321, 2018>.
33. Scioldo, G. (1991) Isomap and rotomap- 3D surface modelling and rockfall analysis. *Geo and Soft*, Torino.

34. Şener, E. (2019) İnsansız hava araçları kullanılarak olası kaya düşmelerinin coğrafi bilgi sistemleri tabanlı 3D modellenmesi: kasımlar köyü (Isparta-Türkiye) Örneği, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23 (2) , 419-426. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.501482>.
35. Topal, T., Akın M. and Ozden, A.U. (2007) Assessment of rockfall hazard around Afyon Castle, *Environmental Geology*, v.53, pp.191-200. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0633-2>
36. Tunusluoğlu, Mc. and Zorlu, K. (2009) Rockfall hazard assessment in a cultural and natural heritage (Ortahisar Castle, Cappadocia, Turkey), *Environmental Geology* 56(5):963–972. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1198-z>
37. Ulusay, R., Gokceoglu, C., Topal, T., Sonmez, H., Tuncay, E., Erguler, Z.A. and Kasmer, O. (2006) Assessment of environmental and engineering geological problems for the possible re-use of an abandoned rock-hewn settlement in Urgup (Cappadocia), Turkey, *Environmental Geology*, v.50, pp.473-494. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0222-4>
38. Varnes, D.J. (1978) Slope movements: types and processes, In: Schuster, R.L., Krizek, R.J.(Eds.), *Landslide Analysis and Control*, *Transportation Research Board*, Special Report No. 176, Washington, DC, pp. 11–33.
39. Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Gliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, LKA., Gerber, W. and Jaboyedoff, M. (2011) Rockfall characterisation and structural protection—a review. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11:2617–2651. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2617-2011>
40. Youssef, A. M., & Maerz, N. H. (2009). Slope stability hazard assessment and mitigation methodology along eastern desert Aswan-Cairo highway, Egypt. *Earth Sciences*, 20(2). <https://doi.org/10.4197/EAR.20-2.8>
41. Youssef, A.M., Pradhan, B., Kathery, M.A., Bathrellos, G.D. and Skilodimou, H.D. (2014) Assessment of rockfall hazard at Al-Noor Mountain, Makkah city (Saudi Arabia) using spatio-temporal remote sensing data and field investigation, *Journal of African Earth Sciences*, pp.101, pp.309-321. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.09.021>
42. Youssef, A. M., Pradhan, B., Al-Kathery, M. M., Bathrellos, G. D., Skilodimou, H. D., (2015) Assessment of rockfall hazard at Al-Noor Mountain, Makkah city (Saudi Arabia) using spatio-temporal remote sensing data and field investigation, *Journal of African Earth Sciences*, 101: 309–321. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.09.021>
43. Žabota, B., Mikoš, M., and Kobal, M. (2019) Rockfall modelling in forested areas: the role of digital terrain model spatial resolution, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Discuss. <https://doi.org/10.5194/nhess-2019-372>, in review, 2019.

