

3-Boyutlu Kaya Düşme Analizlerinde Geri Verme Katsayısı Etkisinin İncelenmesi

İbrahim Uykun^{1*}, Mutluhan Akın², Ogün Ozan Varol³

¹Şırnak İli Afet ve Acil Durum Müdürlüğü, Jeoloji Yüksek Mühendisi, 73000, Şırnak.

²Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir.

³Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 65080, Van.

Özet

Türkiye, jeolojik, jeomorfolojik ve iklim özellikleri nedeniyle bulunduğu coğrafyada doğal afetler sık yaşanmakta ve bu afetler arasında kaya düşmeleri, ülkenin pek çok bölgesinde ciddi can ve mal kayıplarına yol açmaktadır. Kaya düşme modelleme çalışmalarında girdi parametresi olarak kullanılan normal (R_n) ve tanjant (R_t) arazi geri verme katsayıları, blokların kinetik enerjisi ve hızıyla birlikte yuvarlanma mesafelerini belirleyen temel parametrelerdir. Bu katsayılar, kaya düşme analizlerinde bloğun yamaç yüzeyine çarpma esnasındaki enerji ve hız kayıplarını belirler, böylece modelde bloğun nasıl bir yörünge ve hareket dinamiği izleyeceğini ortaya koymaktadır. Geri verme katsayıları, arazi deneyleri (blok düşürme) veya kaya düşmelerinin yaşandığı sahalardaki daha önce düşen blokların konumları üzerinden geriye dönük analizlerle belirlenebilmekte veya arazi deneyleri ve geriye dönük analizlerin uygulanmadığı alanlarda, benzer litolojilere sahip veya yakın bölgeler için daha önceki bilimsel çalışmalarda kullanılan verilerden yararlanılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında, kaya düşme modellemelerinde yapılan analizlerde farklı yöntemler kullanılarak belirlenebilen ve analizler için önemli bir parametre olan arazi geri verme katsayılarının (R_n ve R_t) yuvarlanma hattı, sıçrama yüksekliği, kinetik enerji ve yanal saçılım gibi unsurlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmada, gerçek bir sayısal yüzey modeli kullanılarak 3-boyutlu kaya düşme simülasyonları gerçekleştirilmiş ve yapılan analizlerde R_n ve R_t katsayılarının değerleri belirli sınırlar arasında değiştirilerek parametreler üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, R_n ve R_t arazi geri verme katsayılarındaki değişimlerin tüm parametrelerde farklı oranlarda değişikliğe neden olduğu ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması ile R_t katsayısının R_n katsayısına kıyasla parametreler üzerinde daha etkili olduğu veri setleri ve dağılım grafikleri ile ortaya konmuştur. R_t katsayısının değerinin artması ile özellikle 0,5 değerinden itibaren yuvarlanma mesafesi ve yanal saçılımlar da önemli değişiklikler belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler

Kaya Düşmesi, Geri Verme Katsayısı, Kinetik Enerji, Sıçrama Yüksekliği, Yuvarlanma Mesafesi

Investigation of the Effect of Restitution Coefficient on 3-Dimensional Rockfall Analyses

Abstract

Due to its geological, geomorphological and climatic characteristics, Türkiye frequently experiences natural disasters, among which rockfalls pose significant risks, causing considerable loss of life and property in many regions of the country. In rockfall modeling studies, the normal restitution coefficient (R_n) and tangential restitution coefficient (R_t) are key input parameters that, along with the blocks' kinetic energy and velocity, determine their runout distances. These coefficients govern the energy and velocity losses of a block upon impact with the slope surface, thereby influencing the trajectory and movement dynamics of the block within the model. Restitution coefficients can be derived from field tests (such as block drop tests), back analyses based on the positions of previously fallen blocks in areas where rockfalls have occurred, or from data used in prior scientific studies for regions with similar lithological characteristics when field tests or back analyses cannot be applied. This study examines the effects of terrain restitution coefficients (R_n and R_t), which can be determined using various methods in rockfall modeling analyses, on factors such as runout paths, bounce heights, kinetic energy, and lateral dispersion. Three-dimensional rockfall simulations were conducted using a real digital surface model, and in the analyses, the values of R_n and R_t were varied within specific ranges to observe their impact on the parameters. The results revealed that changes in the values of R_n and R_t caused varying degrees of change across all parameters. Comparative analysis demonstrated that the R_t coefficient had a more pronounced effect on the parameters compared to the R_n coefficient, as supported by datasets and distribution graphs. It was also observed that an increase in the R_t coefficient, especially from values of 0.5 and above, led to significant changes in runout distances and lateral dispersions.

Keywords

Rockfall, Restitution Coefficient, Kinetic Energy, Bounce Height, Runout Distance

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (486) 2161534 Faks: +90 (486) 2161991

E-posta: ibrahmuykun50@gmail.com (Uykun İ.), mutluhanakin@nevsehir.edu.tr (Akın M.),
ogunozanvarol@yyu.edu.tr (Varol O.O.)

Gönderim Tarihi / Received : 14/11/2024

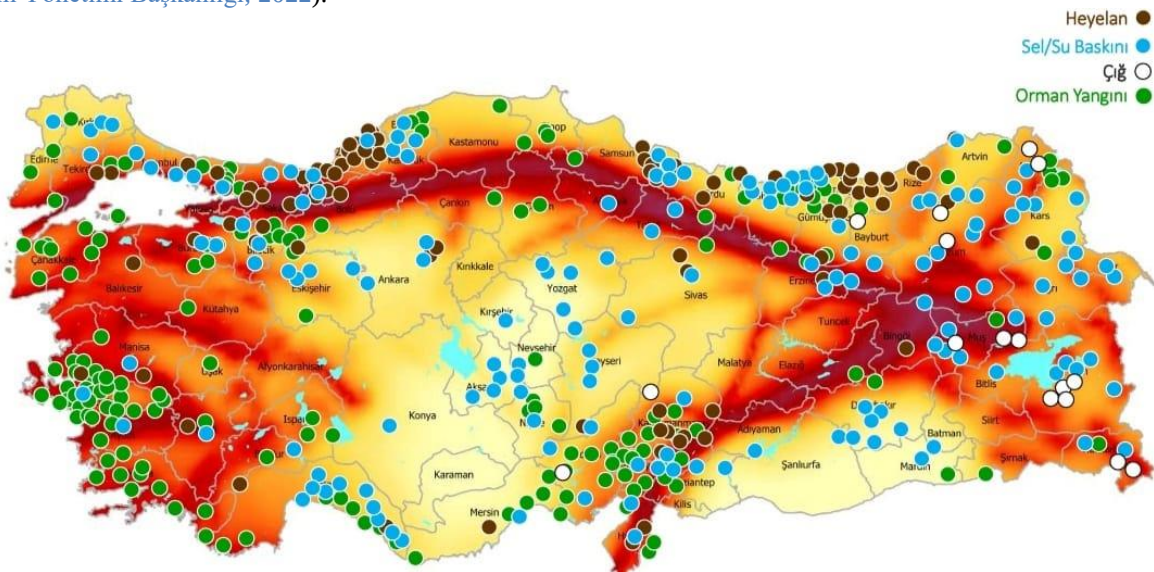
Kabul Tarihi / Accepted : 15/01/2025

1. Giriş

Kaya düşmesi, yamaç veya şevlerde süreksizlik yüzeyleri boyunca çeşitli iç ve dış etkenlerin etkisiyle kopan kaya bloklarının yerçekiminin etkisiyle topoğrafik eğim boyunca oldukça ani ve hızlı hareketi olarak tanımlanmaktadır (Varnes, 1978; Lambert & Nicot, 2011). Kaya düşmeleri, dik yamaçlarda, şevlerde ve açık maden ocaklarında meydana gelen; karayolu, demiryolu gibi çizgisel yapıların yanı sıra yamaç kenarlarına kurulmuş yerleşim yerlerinde yaşayanlara zarar verebilen bir doğal afettir (Volkwein vd., 2011). Kaya düşmeleri ani ve hızlı gerçekleşmesinden dolayı kestirilmesi zor bir duraysızlık türüdür. Kaya düşmelerine etki eden çok sayıda faktör mevcut olup, jeolojik ve morfolojik yapı, süreksizlik, ayrışma, deprem dalgaları vb. unsurlar kaya düşmelerinin gelişiminde önemli rol oynamaktadır (Ritchie, 1963). Bu faktörler, yapısal faktörler (yamacın jeolojik yapısı, süreksizlik takımları vb.), çevresel faktörler (yağmur, donma-çözülme, farklı ayrışma vb.) ve antropojenik faktörler (kontROLSÜZ patlatma uygulamaları, uygun olmayan şev tasarımı vb.) olarak üçe ayrılmaktadır.

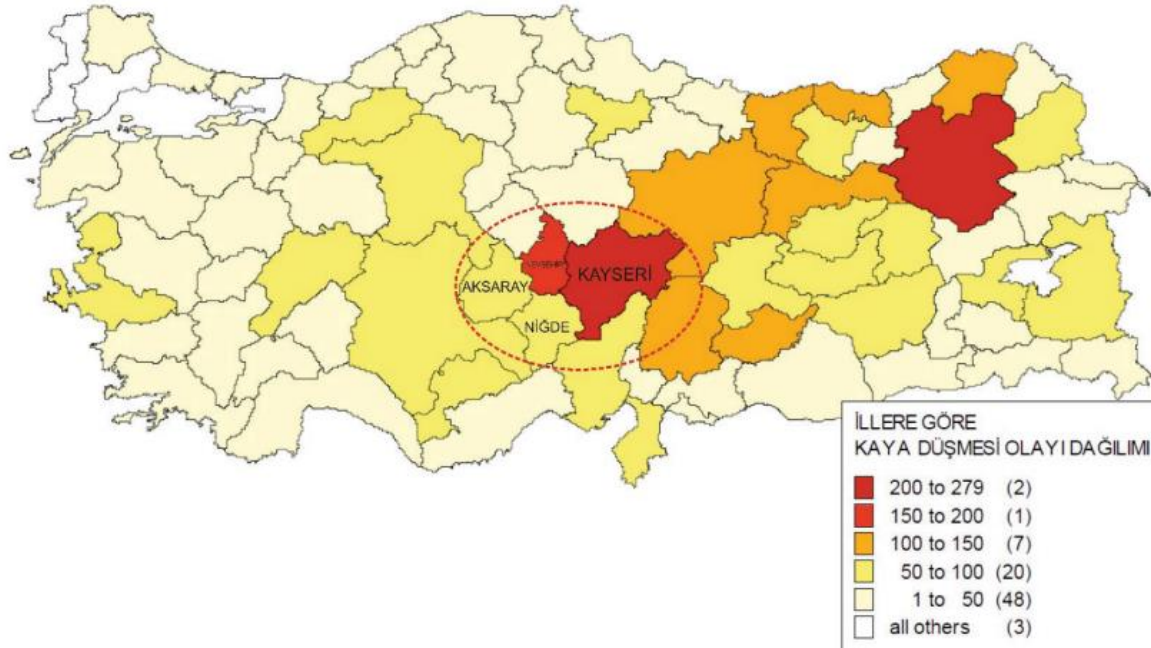
Kaya blokları, süreksizlik yüzeylerindeki suların donma-çözülme etkisiyle oluşturduğu içsel basınçlar, deprem dalgalarının oluşturduğu dinamik yükler, farklı ayrışma ve ağaç köklerinin zamanla büyümesi gibi birçok faktörden dolayı kaynak zondan kopar ve çoğunlukla dik bir yamaçtan serbest düşme hareketi sergiler (Varol vd., 2023). Kaya düşmesini hızlandıran önemli etkenlerden biri döngüsel olarak meydana gelen donma-çözülme aktivitesidir (Grove, 1972). Yoğun yağışların, donma-çözülme çevrimlerinin ve sismik aktivitenin fazla olduğu bölgelerde kaya düşmeleri daha sık gözlenmektedir (Wyllie, 2015). Atmosferik etmenler ve aşırı yağışlar, kaya düşmelerini ciddi oranda tetiklemektedir. Süreksizliklerdeki su havanın soğuması ile birlikte donarak buza dönüşür, hacminde % 9 oranında genişleme meydana gelir ve böylelikle süreksizlik duvarlarına basınç uygulayarak süreksizlik açıklığının artmasına ve kaya kütlelerinin duraylılığının olumsuz yönde etkilenmesine yol açar. Kanada Rocky Dağları'nda kaya düşmeleri Gardner (1983) tarafından gözlemlenmiş ve kaya düşmelerinin özellikle çevrimsel donma ve çözölmeye maruz kalan aşırı dik yamaçlarda meydana geldiği sonucuna varılmıştır. İrlanda'da düşük şiddette, yüksek frekanslı kaya düşmeleri Douglas (1980) tarafından incelenmiş ve donma-çözölmenin kaya düşmesi üzerindeki etkisi vurgulanmıştır. Ayrıca kaya kütlelerinin dayanım ve bloklu özelliklerinin de önemli bir rol oynadığı belirtilmiştir. Bu durum, kaya düşmesinin yamacın hem morfolojik hem de jeolojik karakteri ile kaya yüzeyinde etkili olan atmosferik etkenler tarafından kontrol edildiğini göstermektedir (Luckman, 1976).

Türkiye sahip olduğu jeolojik, jeomorfolojik ve iklimsel koşulları nedeniyle ve ortalama yükseltisi oldukça fazla olan dağlık ülkelerden biri olmasından dolayı, kütle hareketlerinin önemli bir tipi olan kaya düşme olaylarının aktif olarak yaşandığı ülkelerden biridir (Utlı vd., 2020). Bu nedenle kaya düşmeleri ile ilgili yapılan çalışmalarda en doğru ve sahaya en uygun çalışmanın gerçekleştirilebilmesi can ve mal kaybını asgari düzeye indirebilmek için oldukça önemlidir. Jeomorfolojik açıdan yüksek eğime ve dik yamaçlara sahip olan dağlık bölgelerde gerçekleşen kaya düşme olayları, çok büyük zararlara neden olduğu gibi zaman zaman can kayıplarına da yol açmaktadır (Alemdağ vd., 2022a). Kaya düşmeleri tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de meydana gelen afetler arasında, olay sayısı bakımından %10'luk ve etkilenen insan sayısı bakımından %7'lik bir orana sahiptir. Buna göre, kaya düşmeleri; deprem, heyelan ve su baskınından sonra dördüncü sırada yer almaktadır (Akın vd., 2022). Afet Risk Analiz Sistemi (ARAS) Projesi, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından 2017 yılı itibarıyla başlatılmış ve proje kapsamında 2017-2022 yılları arasında toplamda 34 bin 593 heyelan, 4822 kaya düşmesi ve 880 çığ, 604 obruk kayıt altında alındığı belirtilmiştir (Şekil 1) (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2022).



Şekil 1: AFAD'ın ARAS projesi kapsamında kayıt altına alınan kütle hareketleri (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2022)

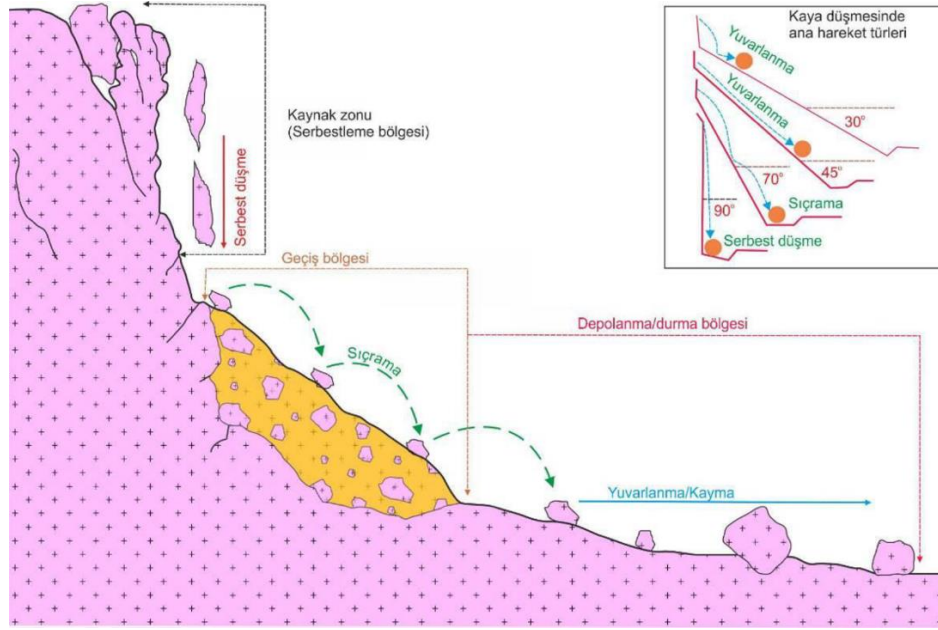
Afet İşleri Genel Müdürlüğü'nün 2008 yılında hazırladığı raporda, en fazla kaya düşmesi olayının yaşandığı iller sırasıyla, Şekil 2'de görüldüğü üzere 279 adet ile Kayseri, Erzurum (229) ve Nevşehir (179)'dir (Gökçe vd., 2008). Kaya düşmeleri Nevşehir ili ve yakın çevresinde, özellikle Ürgüp ve güneyinde yoğun bir şekilde gözlenmektedir (Uykun, 2024).



Şekil 2: 1950-2008 yılları arasında Türkiye'de yaşanan kaya düşmelerinin mekânsal olarak dağılımı (Gökçe vd., 2008)

Kaya düşmelerinde düşen kaya bloğunun boyutu ve şekli, yamacın eğimi ve yamaç pürüzlülüğü gibi etkenlerden dolayı düşen blok farklı düşme hatlarında hareketine çok hızlı ve ani olarak devam etmektedir. Bu durum kaya düşmelerinin değerlendirilmesi ve iyileştirme çalışmalarının gerçekleştirilmesini zorlaştırmaktadır. Kaya düşmelerinde kaynak alandan kopan bloğun durma noktasına kadar yuvarlanarak, sıçrayarak hareket ettiği hattı, depolanma durumu, yüzey morfolojisi ve yamacın eğimine göre gruplandırmak mümkündür (Akın vd., 2019). Kaya bloğunun serbest kaldığı nokta ile durma noktasına kadar uzanan mesafe “menzil mesafesi” (ulaşabileceği en uzak mesafe) olarak da tanımlanmaktadır (Kalender, 2017). Kaya bloklarının çeşitli iç ve dış etkenlerin etkisi altında süresizlik yüzeyleri boyunca ayrılarak düşmeye başladığı bölüm “Kaynak Zonu” ve düşme hareketine başlayan bloğun serbest düşme hareketini tamamlaması ve yamaç üzerinde sıçrayarak/yuvarlanarak hareketine devam ettiği bölüm “Yuvarlanma Zonu” olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3). Düşen kaya bloklarının topoğrafya ile daha çok temasta olduğu Yuvarlanma zonu, düşen kaya bloklarının depolanma durumu ve yamacın eğim değerlerine göre “Geçiş Bölgesi” ve “Depolanma Bölgesi” olarak sınıflandırılabilir (Evans & Hungr, 1993).

Kaynak alandan kopan kaya bloğu durma noktasına kadar çarpma etkisi altında parçalanmadan, kinetik enerjisi sönmüldüğü noktada durarak hareketini tamamlayabilir. Fakat serbest düşme hareketini tamamlayan kaya bloğu çarpma etkisi altında veya yuvarlanma hattı üzerinde sıçrama/yuvarlanma etkisinde birden çok bloğa ayrılarak hareketine çoklu blok şeklinde de devam edebilir.



Şekil 3: Yamaç eğimlerine bağlı olarak kaya düşmelerinde gözlenen hareket türleri ve diğer morfolojik parametreler (Fanos & Pradhan, 2018; Evans & Hungr, 1993'den değiştirilerek)

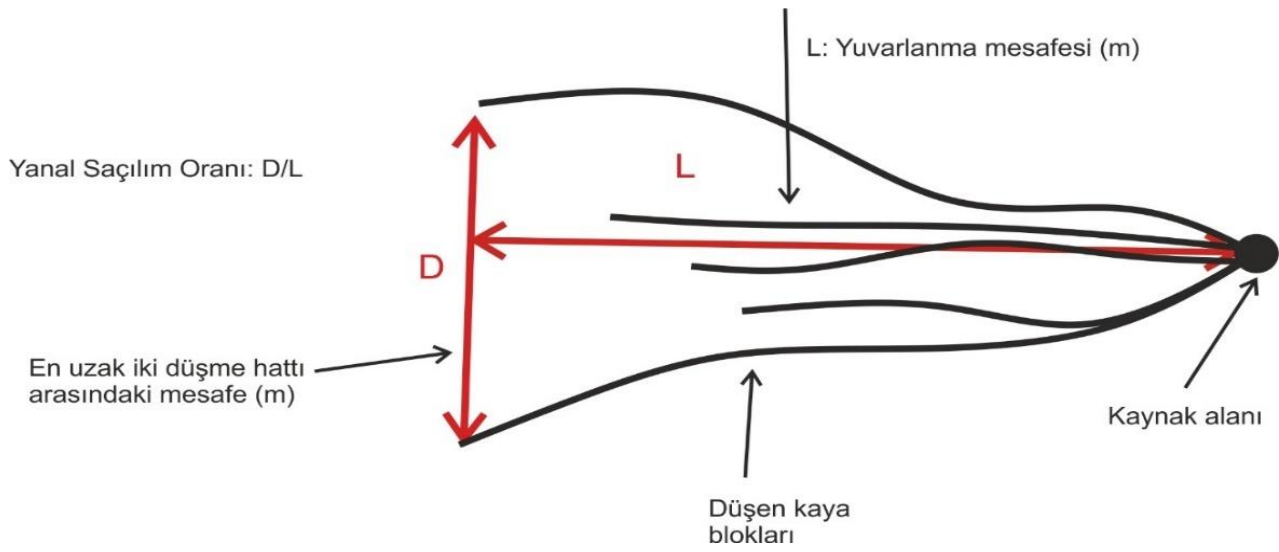
Kaya düşmesi kaynaklı problemlerin önüne geçilebilmesi için yerleşim yerlerinde ve ulaşım güzergahlarında kaya düşme analizlerinin yapılarak tehlike sınırlarının belirlenmesi oldukça önemlidir (Akin vd., 2018). Kaynak alandan ayrılan bloğun ne şekilde bir yol izleyeceğinin tahmininin güç olmasından dolayı kaya düşme riskini en aza indirmek için yapılacak çalışmalarda verilerin doğru ve net bir şekilde ortaya konması ve toplanan veriler ışığında analizlerin yapılması gerekmektedir. Kaya düşme riski bulunan sahalarda geçmişte yaşanan kaya düşmeleri ile ilgili veriler toplanmalı ve sahada hangi bölgelerden kaya düşmeleri yaşandığı tespit edilmelidir. Bu sayede yeniden olması muhtemel kaya düşmelerinin hasar boyutu hakkında öngörude bulunulabilir. Çalışma yapılacak alanda yamacın topoğrafik eğimi, bölgenin ve alanın litolojisi, blok boyutları ve şekli ve tehlike altında olan ev, okul vb. yapılar kayıt altına alınmalıdır. Kaya düşme hattının kaynak alanı ve yuvarlanma hattı (geçiş bölgesi ve depolanma bölgesi) tespit edilerek analiz çalışmalarının belirlenen veriler yardımıyla yapılması gerekmektedir.

Kaya düşme sahalarında kaynak alanda bulunan kaya kütlelerinde kinematik analizlerin gerçekleştirilmesi ve kaya kütlesi hakkında daha net bir bilgiye sahip olunması için süreksizlik hat etüdü çalışmalarının yapılarak, bünyesinde barındırdığı süreksizliklerin aralığı, açıklığı, devamlılığı, pürüzlülüğü, dolgu, bozunma durumu vb. gibi özelliklerin ortaya konulması gerekmektedir. Kaya kütlelerinin dayanımları arazide yapılacak Schmidt Çekici deneyi veya kaya kütlelerinden örnek olarak kaya malzemesinin fiziksel ve indeks özellikleri laboratuvar deneyleri ile belirlenebilmektedir. Sahada birden farklı litolojilerin bulunması durumunda her birim için bu özelliklerin belirlenmesi kaya kütlelerinin yenilme mekanizmasının ortaya konulabilmesi için önemlidir.

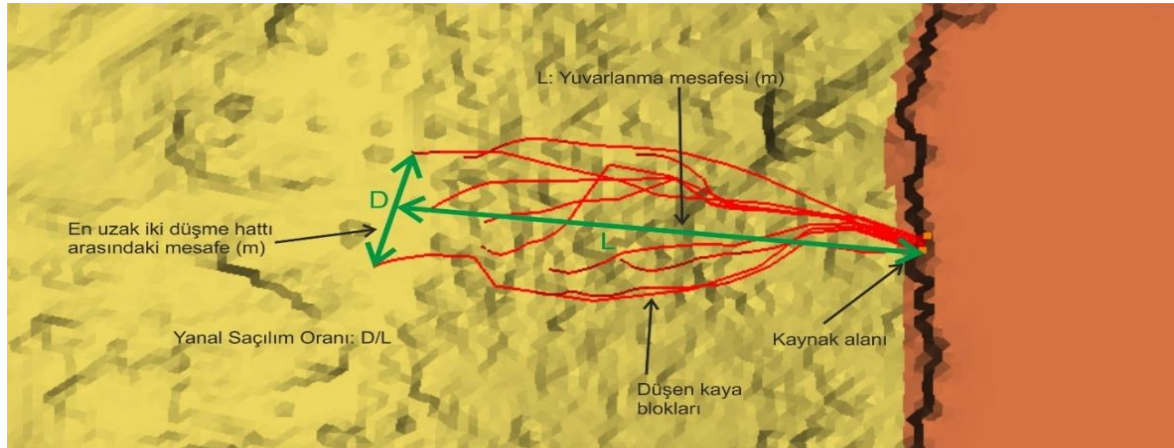
2-boyutlu veya 3-boyutlu modellerde kaya düşme analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için arazinin sayısal yüzey modelinin oluşturulması gerekmektedir. Kaya düşmelerine ait yüzeylerin kantitatif açıdan 3-boyutlu yüksek doğrulukta ve hassasiyette modellenmesinde farklı veri kaynaklarından elde edilen yüksek çözünürlükte ve yersel doğrulukta üretilmiş sayısal yüzey modelleri (SYM) kritik rol oynamaktadır (Bounab vd., 2022). Arazi sayısal yüzey modeli, sahada yersel lazer tarama (TLS) veya insansız hava araçları (İHA) ile alınan görüntülerden fotogrametrik yöntemlerle elde edilen yüksek çözünürlüklü koordinatlı nokta bulutları ile oluşturulmaktadır (Polat, 2020; Alemdağ vd., 2022b, Varol vd., 2023; Utlu & Akgümüş, 2023). Hazırlanan sayısal yüzey modeli ve girdi parametresi olarak toplanan veriler ile gelişmiş yazılım programları kullanılarak analizlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, RocPro3D yazılımı ile 3-boyutlu kaya düşmesi simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Kaya düşme sahalarında yapılacak analizlerin 3-boyutlu modellemelerden yararlanılarak gerçekleştirilmesi, kaya düşme mekanizmasının daha net anlaşılabilmesini sağlamaktadır. Muhtemel kaya düşme durumu ile karşı karşıya olan kaya bloklarının modellenmesi, oluşabilecek riskin boyutunun anlaşılabilmesi için, kaynak alan, kinetik enerji (kJ), sıçrama yüksekliği (m), hız (m/s), birikim ve depolanma alanları, yörüngelerini tespit etmek açısından büyük önem taşır (Alemdağ vd., 2022b).

3-boyutlu topoğrafik değişkenliklerin kaya düşme hatları üzerindeki en önemli etkisi yanal saçılımlardır (Crosta & Agliardi, 2004). Şekil 4 ve 5'te görüldüğü üzere yanal saçılım, bir noktadan yuvarlanan bloğun, en uzak iki düşme hattı arasındaki mesafe ile yuvarlanma mesafesi arasındaki oran olarak tanımlanmaktadır (Turner & Schuster, 2012). 2-boyutlu kaya düşme analizleri belirli bir kesit üzerinde yapılabildiğinden kaynak alanından süreksizlikler boyunca ayrılan kaya bloğunun düşme hattı üzerindeki hareketi boyunca yanal saçılım etkisi tespit edilememektedir.

Yanal saçılım oranı kaynak alandan koparak düşen kaya bloğunun hızı ve topoğrafya pürüzlülüğü tarafından kontrol edilmektedir (Uykun, 2024). 3-boyutlu kaya düşmelerinin en önemli avantajı topoğrafyanın kaya düşme hatları üzerindeki yön değiştirici etkisinin modellere dahil edilebilmesidir. Öte yandan, 3-boyutlu kaya düşme analizleri için en önemli dezavantaj ise analizler için gerekli olan sayısal yüzey veya arazi modellerinin oluşturulabilmesi ve parametre dağılımının bu modeller üzerinde haritalanabilmesi için oldukça performanslı yazılımların ve donanımların bulunması gerekliliğidir (Volkwein vd., 2011). Son 30 yıl içerisinde 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde kullanılabilecek çok sayıda yazılım geliştirilmiştir (Akın vd., 2019). Literatürde yapılan kaya düşme analiz çalışmalarında; Crosta ve Agliardi, (2004) yaptıkları çalışmada HY-STONE yazılımını, Scioldo, (2006) yaptığı çalışmada ROTOMAP yazılımını, Dorren vd., (2004) yaptıkları çalışmada Rockyfor3-D yazılımını, Christen vd., (2007) yaptıkları çalışmada RAMMS: Rockfall yazılımını, Lan vd., (2007) yaptıkları çalışmada RockFall Analyst yazılımını, Jaboyedoff ve Labiouse (2011); Castelli vd., (2021) yaptıkları çalışmada QGIS-Qproto yazılımını ve Quanterra, (2003) yaptığı çalışmada CONEFALL yazılımını kullanarak kaya düşmesi analizleri gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca RocPro3D, (2014) tarafından geliştirilen RocPro3D yazılımı da kaya düşme analizleri için kullanılmaktadır (Uykun, 2024).



Şekil 4: Yanal saçılım oranının hesaplanması (Uykun, 2024)



Şekil 5: RocPro3D yazılımının plan görünümü üzerinde yanal saçılım oranının hesaplanması (Uykun, 2024)

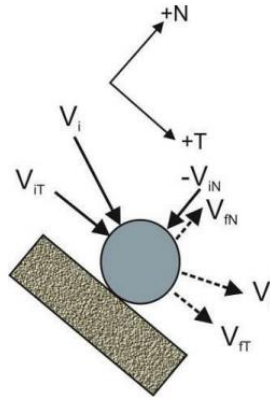
Kaya düşme analizlerinde en önemli girdi parametrelerini oluşturan arazi geri verme katsayıları, kaynak alandan koparak düşen kaya bloğunun serbest düşme hareketini tamamladığında şev yüzeyine çarpması ve geri sıçraması sırasındaki hız değişimleri ve enerji kayıplarını kontrol etmektedir. Sürtünme katsayısı ise düşen kaya bloğunun yüzeye çarparak sıçraması ve sonrasında yuvarlanarak veya kayarak topoğrafya üzerinde hareket etmesi sırasındaki enerji kayıplarını kontrol etmektedir. Schweigl vd., (2003) kaya düşmelerinin modellenmesinde en önemli faktörlerin yamacın geometrisi ve yamaç boyunca enerji kaybının büyüklüğünün bir ifadesi olan geri sıçrama katsayılarının olduğunu vurgulamışlardır.

Geri verme katsayısı iki cismin veya bir cisim ile bir yüzeyin çarpışması sırasında elastik olmayan yer değiştirmeler yüzünden kaybedilen enerji miktarını tanımlamakta kullanılan bir büyüklüktür (Ashayer, 2007). Geri verme katsayısının aldığı değerler teorik olarak, 0 kinetik enerji kaybının yaşandığı mükemmel esnek olmayan çarpışmayı tanımlamak üzere ve 1 kinetik enerji kaybının yaşanmadığı mükemmel esnek çarpışmayı tanımlamak üzere 0 ile 1 değerleri arasında değişmektedir (Stronge, 2000). Genellikle çarpışmadan önceki (V_{in} , V_{it}) ve sonraki (V_{rn} , V_{rt}) hız vektörleri çarpışmanın gerçekleştiği yüzeye dik ve teğet birbirine dik iki ayrı vektöre ayrılarak normal geri verme katsayısı (R_n) ve teğet geri verme katsayısı (R_t) eşitlik 1’de sunulan formüller ile hesaplanmaktadır (Ashayer, 2007).

$$R_n = \frac{v_{rn}}{v_{in}} \quad (1)$$

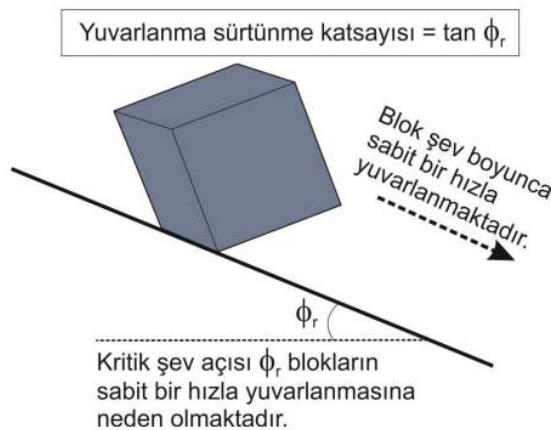
$$R_t = \frac{v_{rt}}{v_{it}}$$

Geri verme katsayıları Şekil 6’da görüldüğü üzere kaya bloğunun serbest düşme aşamasından sonra arazi yüzeyine çarparak sıçramasının sonucu olarak ortaya çıkan farklı hızların oranı olup, normal ve teğetsel (tanjant) olmak üzere iki bileşene ayrılır. Normal geri verme katsayısı (R_n), düşen bloğun çarpma etkisi altında normal eksen yönündeki hızını tanımlar ve etki açısı ile ilişkilidir. Teğetsel geri verme katsayısı (R_t) ise, düşen bloğun çarpma etkisi altında teğetsel hızının azalmasını kontrol eder ve şev/yamaç ile düşen kütle arasındaki sürtünme kuvvetleri tarafından kontrol edilir (Şekil 6) (Akin vd., 2019).



Şekil 6: Düşen blokta çarpmadan önceki ve sonraki hız vektörleri ile normal ve teğetsel bileşenleri (Wyllie, 2015)

Kaya düşmelerinde kaya bloğunun serbest düşme aşamasından sonra şev yüzeyine çarpmasından sonraki hareketi normal ve teğetsel geri verme katsayıları ile tanımlanırken, yuvarlanan bloklarda enerji kayıpları sürtünme katsayısı veya yuvarlanma sürtünme açısı kavramı ile belirlenmektedir (Statham, 1979; Okura vd., 2000). Yuvarlanma sürtünme katsayısı Şekil 7’de gösterildiği gibi, bloğun bir şev üzerinde sabit bir hızla hareketine başlaması için gerekli olan açının tanjantı olarak ifade edilmektedir. Bu açıdan daha dik bir şevde düşen blok hızlanmakta, daha yatık şevlerde ise yavaşlayarak durmaktadır. Bu nedenle, sürtünme katsayısı bloğun şev üzerindeki ufak topoğrafik düzensizliklerde yavaşlamasını veya hızlanmasını kontrol eden bir parametredir. Yuvarlanma sürtünme katsayısı malzemelerin türü ve şekli ile blok boyutu ve şev yüzeyindeki döküntü boyutu arasındaki orana bağlı olarak değişmektedir (Azzoni vd., 1995).



Şekil 7: Yuvarlanma sürtünme katsayısı (Akin vd., 2019)

Kaya düşmesi olaylarının incelenmesinde kullanılan 3-boyutlu modellerde en önemli girdi parametrelerinden biri arazi geri verme katsayısıdır (Çapar, 2018). Kaya düşmelerinin gözlemlendiği sahalarda, 3-boyutlu analizlerin yapılabilmesi için en önemli parametrelerden biri olan geri verme katsayılarının belirlenmesi gerekmektedir. Arazi geri verme katsayıları arazide uygun alan bulunması halinde blok düşürme deneyleri veya daha önceden yaşanmış kaya düşmelerinde düşen blokların durdukları nokta dikkate alınarak geriye dönük analizler ile belirlenebilmektedir. Geriye dönük analizlerde düşmüş blokların boyutları ve durdukları noktalara göre, kaynak alandan kopan bloğun durduğu noktaya kadar yuvarlanmasını sağlayan farklı R_n ve R_t çiftleri belirlenmektedir. Belirlenen R_n ve R_t çiftlerinin birleştirildiği doğruların kesiştiği noktaya ait R_n ve R_t çiftleri 3-boyutlu analizlerde girdi parametresi olarak kullanılabilir. İnceleme sahasında daha önceden düşmüş blokların ve blok düşürmeye uygun alanın olmadığı durumlarda R_n ve R_t çiftlerinin belirlenebilmesi için daha önceki bilimsel çalışmalara ait veriler veya literatürde farklı birimler için önerilen R_n ve R_t tablolarından elde edilen veriler kullanılabilir (Uykun, 2024).

Bu çalışma ile farklı yöntemler ile seçilebilen arazi geri verme katsayılarının (R_n ve R_t) yapılan analizlerde düşen kaya bloğunun yuvarlanma hattı, yuvarlanma mesafesi, sıçrama yüksekliği, enerji miktarı ve yanal saçılımı gibi parametreler üzerindeki etkisinin ortaya konulması amaçlanmıştır. Kaya düşme sahalarında sayısal yüzey modeli kullanılarak 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde en önemli girdi parametresi olan geri verme katsayılarının en doğru ve sahaya en uygun olarak belirlenmesinin ne derecede önemli olduğu ve sahaya uygun olmayan değerler kullanıldığında parametreler üzerinde ne türde değişimler olduğunun ortaya konulması hedeflenmiştir.

2. Materyal

2.1. Çalışma Alanı

Nevşehir ili Acıgöl ilçesine bağlı Tatların kasabasında bulunan Tatların Yeraltı Şehri ve civarı çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Kapadokya sınırları içerisinde bulunan Tatların Kasabası, Nevşehir şehir merkezine 25 km ve Acıgöl ilçe merkezine 10 km uzaklıktadır. Senozoyik ve Mesozoyik birimlerden oluşan çalışma alanının jeolojisini Üst Kreatase yaşlı Ortaköy Granotoidi, Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı Tuzköy, Peçenek ve Ürgüp Formasyonunun Kavak Üyesi, Kuvaterner volkanizmasının ürünleri olan Kızıldağ bazaltı ve Karnıyarık Tepe Bazaltı ve güncel yamaç molozu ve alüvyonlar oluşturmaktadır (Akın vd., 2019).

Çalışma alanının güney ve güneybatısında Ortaköy granotoidinin gabro türü kayaları gözlenmektedir. Ortaköy granotoidi gabro, bantlı gabro, diyorit, tonalit, granit, granodiyorit, diyorit porfir, monzonit, siyenit, monzodiyorit, löko-granit, granit porfir bileşimlidir. Gabro kayalarının (w), granitik kayalar içinde anklavları izlenir (Seymen, 1981; Batman, 1978).

Çalışma alanında geniş bir alanda izlenen Tuzköy Formasyonu Tatların Yeraltı Şehri ve yakın civarında gözlenmektedir. Birim çakıltısı, kumtaşı, kıltaşı ve tüfit ardalanımından oluşmuştur. Çakıltısı gevşek çimentoludur ve 10-20 santimetre çapında çakıllar (diyabaz, split, granit, andezit, granodiyorit, metamorfik kayaç) içermektedir (Atabey vd., 1987).

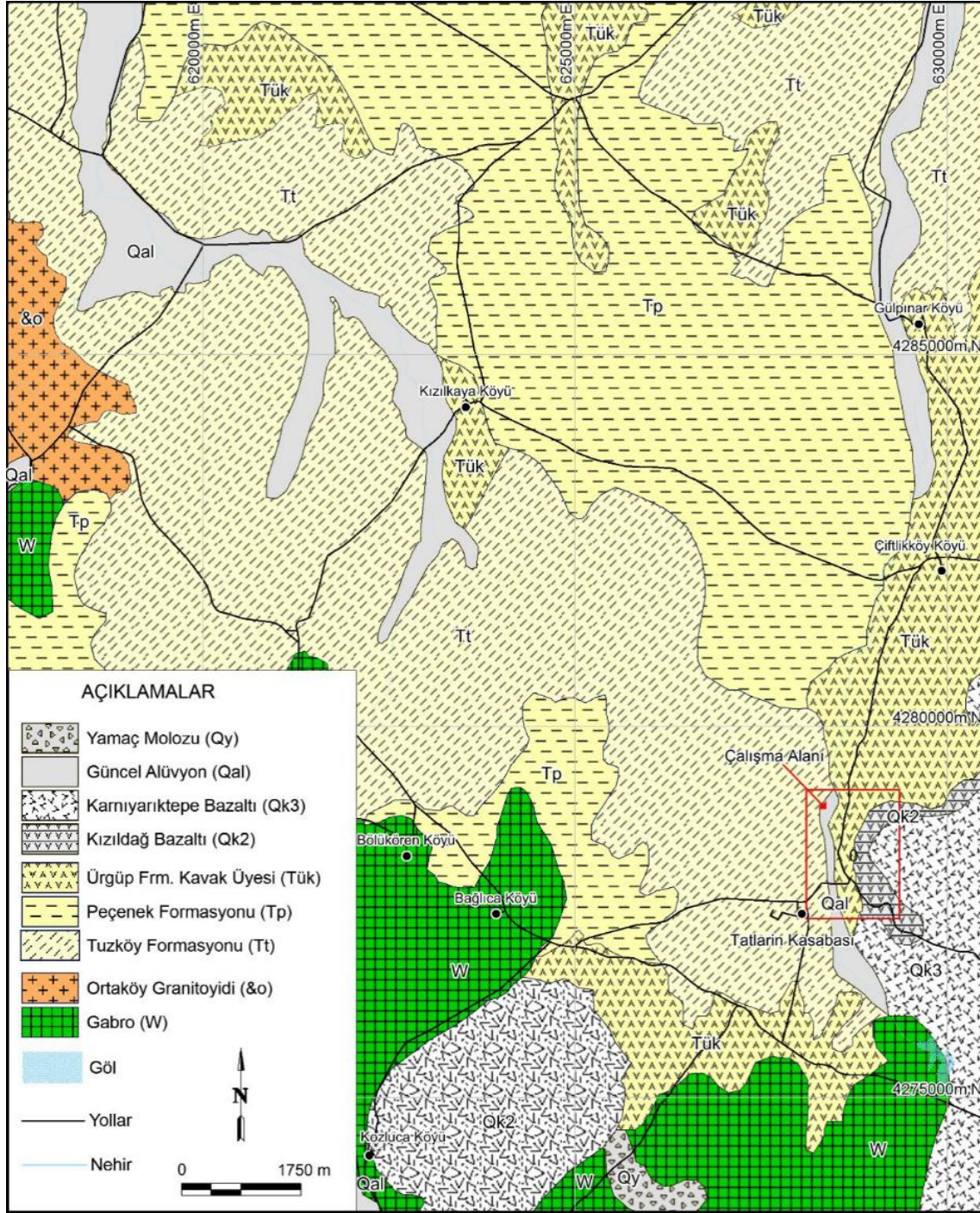
Peçenek formasyonu, beyaz gri renkli, orta-ince kum tane boyutlu ve teknesel çapraz tabakalı, gevşek tutturulmuş kumtaşı, çakıllı kumlu tüfitler, miltası, kıltaşı ile kaba kumtaşı ve çakıltılarından oluşmaktadır (Atabey, 1989a).

Çalışma alanında Kavak Üyesi (Tük) ile temsil edilen Ürgüp Formasyonu, oldukça dar bir alanda izlenmektedir. Ancak çalışmanın konusunu oluşturan Tatların Yeraltı Şehri'nin kaya oyma yapılarının yer aldığı birim olması nedeniyle çalışma açısından oldukça önemlidir. İgnimbirit karakterindeki birim, açık kahve, bej ve sarımsı beyaz renkli olup, yer yer ankelit ve pomza içermektedir. Kavak üyesinde beyaz-kirli beyaz, andezitik bileşimli camı tüfitli, köşeli parçacıklı pomza külü düzeyleri de izlenmiştir. Çalışma alanında farklı seviyeler şeklinde izlenen birim yörede ilk ignimbirit oluşumlarını temsil etmektedir (Atabey, 1989b).

Çalışma alanının kuzeydoğusunda yüzlek veren ve çalışmanın konusu oluşturan kaya düşmelerinin kaynak zonunu oluşturan Kızıldağ bazaltları, kızılımsı, siyah renkli, tavan düzeyleri gözenekli, taban düzeyleri sert ve siyah masiftir. Bölgedeki bazaltlar, soğuma çatlaklı, plajiyoklas ve olivince zengindir. Olivin bazalt özelliğindeki birimin kalınlığı 10 m kadardır (Atabey, 1989b).

Karnıyarıktepe Bazaltı, pembe turuncu siyah, bazaltik andezit ve traki-andezit niteliklidir. Kırıklı, sert ve dayanımlıdır. Keskin kenarlı plato şeklinde yüzeyler. Camı hamur içinde plajiyoklaslar arasına dağılmış plajiyoklas fenokristalleri ve piroksen lataları gözlenir (Atabey, 1989b).

Yamaç molozları haritanın güneyinde sınırlı bir alanda izlenmekte olup, Kızıldağ Bazaltı çevresinde görülür. Çalışma alanında dar hatlar boyunca tali derelerin oluşturduğu güncel alüvyonların kalınlığı birkaç metre civarındadır. Alüvyonlar genelde çakıl, kum, silt ve kil tane boyutundaki malzemeden oluşmaktadır (Şekil 8) (Atabey, 1989a).



Şekil 8: Tatlarin ve yakın çevresinin jeoloji haritası (Atabey, 1989a)

Kapadokya bölgesinde bulunan Tatlarin Yeraltı Şehri ve çevresi doğal, tarihi ve kültürel açıdan korunması gereken önemli değerler arasında bulunmaktadır. Tatlarin Yer Altı Şehri ve çevresinde çok miktarda kaya düşme afeti yaşanmıştır ve bölgede olumsuz bir etki oluşturmaktadır (Şekil 9). Tatlarin yerleşim alanından daha yüksek kotlarda bulunan Tatlarin Yeraltı Şehri jeolojik olarak ignimbiritler içerisinde oluşmuştur. Tatlarin Yeraltı Şehrinin oluşumunda etkili olan ignimbiritler yüksek dayanımlı bazaltlar tarafından örtülmüştür. Bölgede yaşanan kaya düşmelerinin kaynak alanını bazaltlar oluşturmaktadır. Bazaltlar bünyesinde barındırdıkları dik ve dike yakın soğuma çatlakları ve dik bir topoğrafyaya sahip olduklarından dolayı kaya kütlelerinden kaya bloklarının süreksizlik yüzeyleri boyunca ayrılmasına oldukça elverişli bir konumdadır.



Şekil 9: Tatların yerleşimi ve tarihi yeraltı şehrinden genel bir görünüm (Uykun, 2024)

Bazaltların duraylılığını olumsuz yönde etkileyen süreksizlik takımları dik ve dike yakın soğuma çatlakları bölgede yoğun şekilde kaya düşmelerine neden olmakta ve yerleşim alanında ciddi risk oluşturmaktadır. İnceleme alanında geçmişte yaşanmış çok sayıda kaya düşmeleri nedeniyle daha önceden düşmüş kaya blokları, daha düşük yamaç eğimine sahip depolanma bölgesi olarak tanımlanabilecek ignimbiritler üzerinde depolanmıştır (Şekil 10). Yapılan analizlerde kaya düşme hattının yuvarlanma zonu bölümünde bloklu bazaltların varlığından dolayı, 3-boyutlu kaya düşme analizlerinde kaynak alandan kopan kaya bloğu serbest düşme hareketini tamamladıktan sonra yuvarlanma zonu bölümünde daha çok sıçrama şeklinde hareket tarzı göstermesinden dolayı bu alan çalışma sahası olarak belirlenmiştir. Çünkü geri verme katsayılarının belirli değerler arasında değiştirilmesiyle düşen bloğun yuvarlanma hattı, sıçrama yüksekliği ve enerji vb. gibi parametreleri üzerindeki etkisi daha net oraya konulması amaçlanmıştır. İnceleme alanında kaya düşme kaynak alanı ve yuvarlanma zonunu oluşturan bölgelerde düşen kaya bloğunun yörüngesini etkileyecek bitki örtüsü bulunmamaktadır (Şekil 10).



Şekil 10: Tatların yerleşim alanı çevresinde mostra veren bazaltlarda gözlenen çok sayıda kaya düşmeleri (Uykun, 2024)

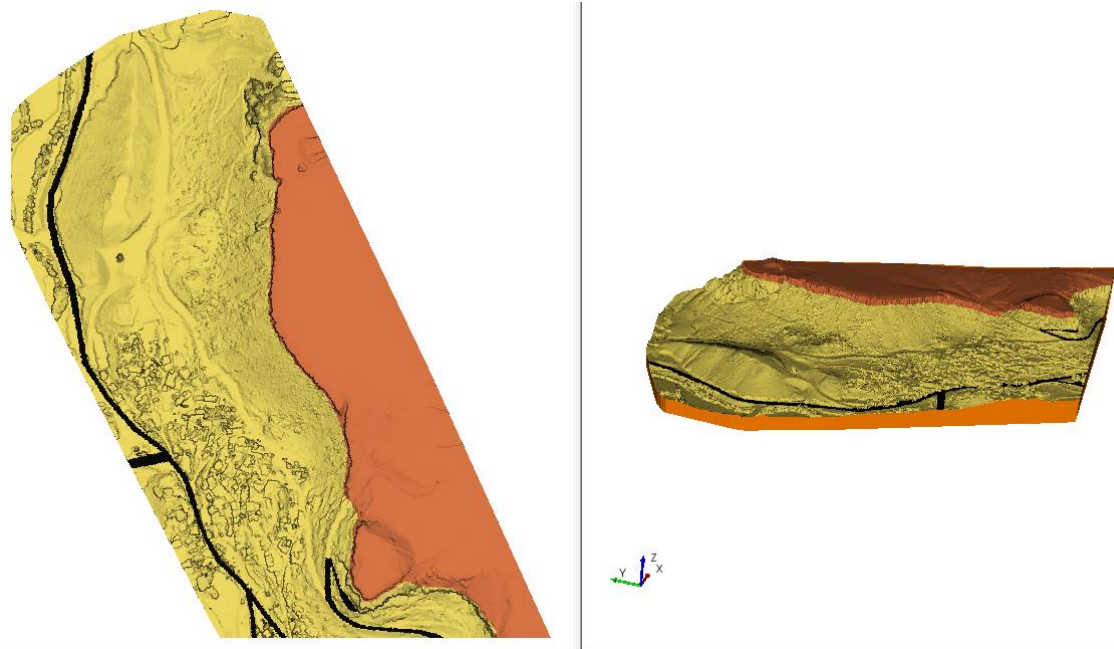
Dinçer vd. (2016) yaptıkları bilimsel çalışmada 2011 yılında Tatların bölgesinde yaşanan kaya düşmesi olaylarını dikkate alarak ve 2014'te sahada yapılan blok düşürme deneyleri ile elde ettikleri arazi geri verme katsayıları ile 3-boyutlu analizler gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, hem 2011 yılında düşen blokları göz önünde bulundurarak hem de 2014 yılında arazi deneyleri sonucunda birbirine yakın arazi geri verme katsayıları elde etmişlerdir. Yapılan bu çalışmada ise farklı arazi geri verme katsayılarının blok dinamiği üzerinde etkisi incelenmiş ve bu değerler parametrik olarak değiştirilmiştir. Fakat Dinçer vd. (2016) sahada yaptıkları blok düşürme deneyleri ve geriye dönük analizler sonucunda elde ettikleri verileri karşılaştırarak ve kalibre ederek farklı birimler için Tablo 1'de görüldüğü üzere geri verme katsayılarını (R_n ve R_t) önermişlerdir.

Tablo 1: *Dinçer vd. (2016)* tarafından Tatların Yeraltı Şehri ve çevresinde yapılan analizler sonucu belirlenen parametreler

Litoloji	Normal geri verme katsayısı (R_n)	Tanjant geri verme katsayısı (R_t)		Sürtünme katsayısı	
	2011 (kaya düşmesi)	2011 (kaya düşmesi)	2014 (arazi testi)	2011 (kaya düşmesi)	2014 (arazi testi)
Bazalt	0.80	0.85	0.80	0.35	0.45
Tüf	0.73	0.76	0.71	0.35	0.45
Kaynaşmış tüf	0.78	0.82	0.77	0.35	0.45
Bloklu bazalt molozu	0.60	0.75	0.70	0.65	0.75
Bloklu tüf molozu	0.60	0.75	0.70	0.55	0.65
Yumuşak tüf	0.55	0.70	0.65	0.55	0.65
Alüvyon	0.50	0.70	0.65	0.50	0.60
Stabilize yol	0.65	0.75	0.70	0.35	0.45
Asfalt yol	0.80	0.85	0.80	0.35	0.45

2.2. Yöntem

Çalışma kapsamında inceleme alanında kaya düşme analizlerinde girdi parametresi olarak belirlenmesi gereken veriler (litoloji, birim hacim ağırlık, süreksizliklerin eğim/eğim yönü vb.) toplanmıştır. Tatların Yeraltı Şehri ve çevresinin 3-boyutlu modeller üzerinde analizlerinin yapılabilmesi için kullanılacak olan sayısal yüzey modeli, İnsansız Hava Aracı (İHA) kullanılarak alınan fotogrametrik görüntülerden elde edilen yüksek çözünürlüklü (~2.7 cm/piksel) nokta bulutu kullanılarak elde edilmiştir. Çalışma kapsamında 3-boyutlu kaya düşme analizleri, yüksek performanslı, kullanımı kolay ve pratik çıktıları ile anlaşılabilir olan, deterministik ve olasılıksal analizler yapılmasına imkan tanıyan RocPro3D yazılımı kullanılmıştır (Şekil 11).



Şekil 11: RocPro3D ile hazırlanan Tatların Yeraltı Şehri ve çevresinin plan görünümü ve 3-boyutlu sayısal yüzey modeli

Çalışma kapsamında farklı yöntemler ile seçilebilen geri verme (R_n ve R_t) katsayılarının kaya düşme analizlerinde parametreler üzerinde yaptığı etkiyi belirleyebilmek için yüksek çözünürlüklü nokta bulut verilerinden elde edilen aynı sayısal yüzey modeli üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Kaya düşme analizlerinde bazalt birimi kaynak alanı oluşturduğu (Şekil 12) ve düşen kaya bloğu burada çoğunlukla serbest düşme hareketini yaparak yüzey ile teması yok denilebilecek kadar az olduğu için bazalt biriminin R_n ve R_t değerleri (R_n : 0,55 ve R_t : 0,9) literatür çalışmalarından elde edilerek sabit tutulmuştur (Akin vd., 2019).

Analizlerde düşen kaya bloklarının parametrelerinde (yuvarlanma hattı, yuvarlanma mesafesi, enerji miktarı vb.) meydana gelen değişikliklerin daha net tespit edilebilmesi için kaynak alanda 5 farklı noktasal kaynak alanı belirlenmiş ve her noktasal kaynak alanından 1 adet kaya bloğu ve yanal saçılım etkisinin incelenebilmesi için 10 adet kaya bloğu düşürülmüştür. Analizlerde deterministik yaklaşım tercih edilerek analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 14). Bazalt biriminden oluşan kaynak zon genel olarak benzer özellik göstermektedir. Ancak Şekil 10 ve 13'te görülebileceği üzere yuvarlanma zonundaki daha önce düşen blokların yoğunluğu değişiklik arz etmektedir. Bu nedenle farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip yüzeylerin etkisini de değerlendirebilmek için düşme potansiyeli olan bölgelerden ve bu blokların düşmesi halinde yuvarlanabileceği yüzeylerin değişiklik gösterdiği 5 farklı nokta kaya düşmesi kaynak noktası olarak seçilmiştir.



Şekil 12: Kaya düşmesi kaynak alanını oluşturan bazaltlar

RocPro3D yazılımında girdi parametresi olarak belirlenmesi gereken sürtünme katsayısı kaynak alan için 0,45 ve yuvarlanma zonu için 0,75, daha önceden düşmüş kaya blokları incelenerek blok boyutu olarak 1 m^3 ve kaya bloklarının birim hacim ağırlıkları ise 2500 kg/cm^3 olarak belirlenmiştir (Akın vd., 2019). Çalışma alanında düşen kaya bloğunun serbest düşme hareketini tamamladıktan sonra yuvarlanma zonunda daha önce düşmüş çok sayıda bazalt bloğu bulunmasından kaynaklı ana hareket türü olarak sıçrama tarzı hareket gösterdiğinden dolayı sürtünme katsayılarının değerleri sabit tutularak sadece R_n ve R_t katsayılarının farklı değerleri ile analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 13).

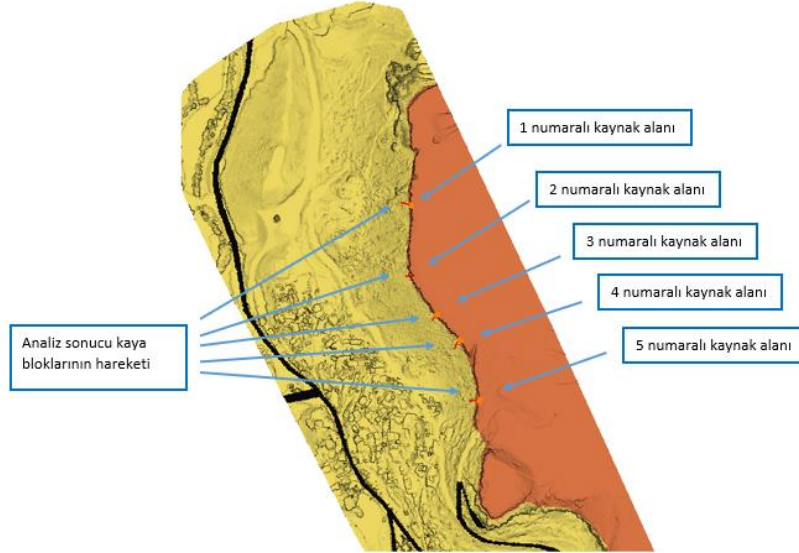


Şekil 13: Daha önceden düşen kaya bloklarının yuvarlanma zonu üzerindeki dağılımı

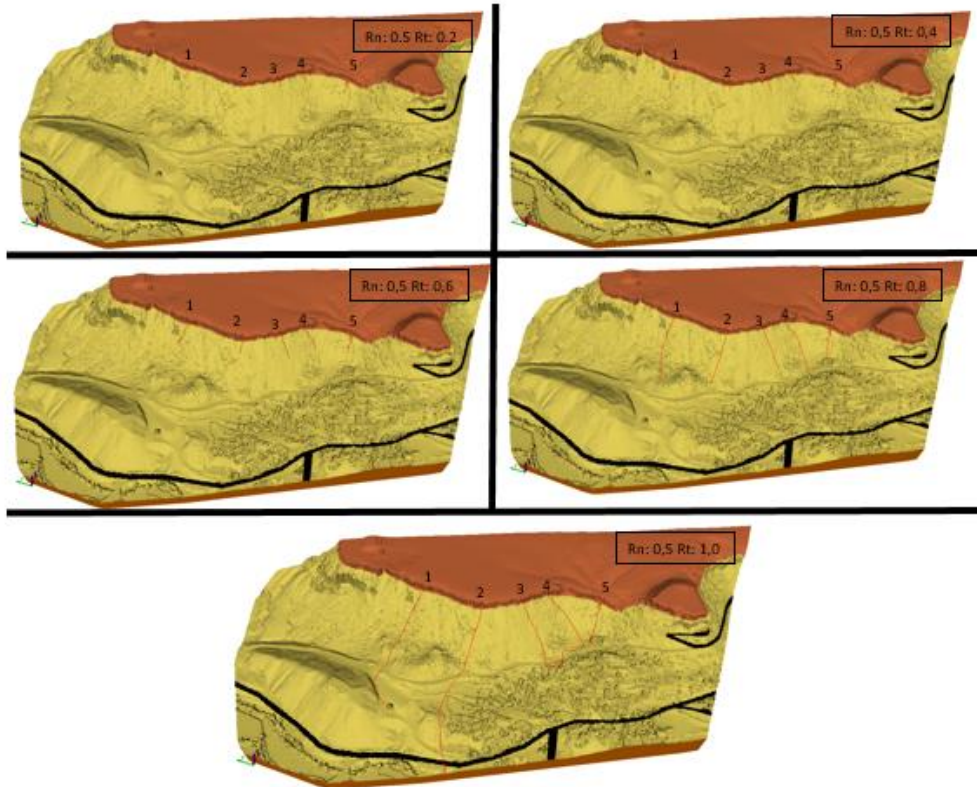
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Tanjant (R_t) Geri Verme Katsayısının Etkisi

Yapılan deterministik kaya düşmesi analizlerinde normal geri verme katsayısı (R_n) 0,5 değerinde sabit tutularak tanjant geri verme katsayısı (R_t) 0,1 ile 1,0 değerleri arasında 0,1'lik miktarlarda artırılarak her kademedeki analizler bütün noktasal kaynak alanları için tekrarlanmıştır. Her analiz sonucunda kaynak alandan kopan kaya bloğunun durma noktasına kadar izlediği yuvarlanma hattı boyunca maksimum yuvarlanma mesafeleri, maksimum kinetik enerjileri ve maksimum sıçrama yükseklikleri kayıt altına alınarak incelenmiştir.



Şekil 14: Kaya düşme analizi sonucu kaya bloklarının izlediği yuvarlanma hattı (R_n : 0,5, R_t : 0,1)



Şekil 15: Kaya düşme analizi sonucu R_n : 0,5 ve R_t : 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0 değerlerinde düşen kaya bloklarının yuvarlanma hattı

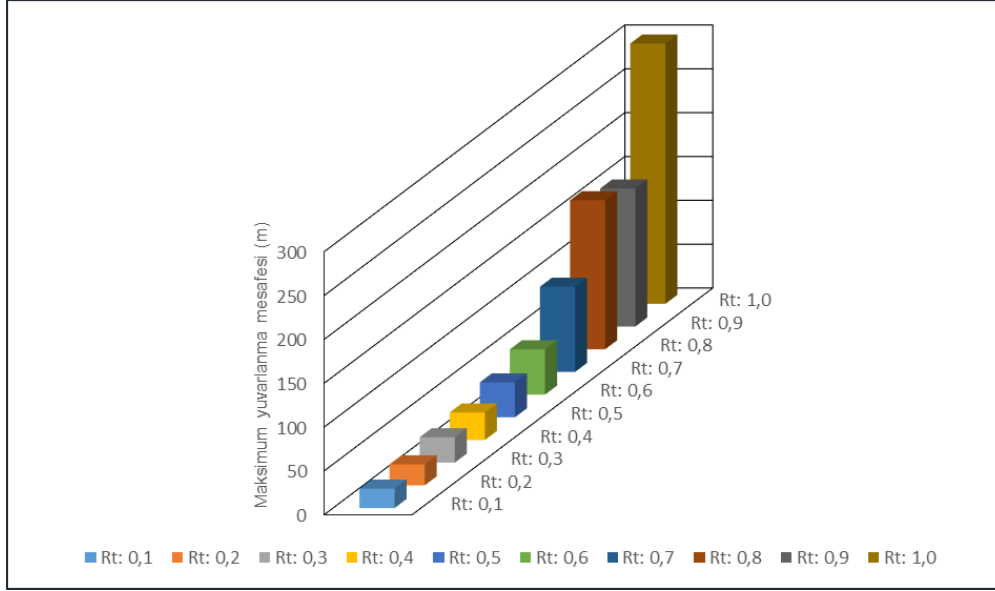
Tablo 2: 5 noktasal kaynak alanında Tanjant (R_t) geri verme katsayısının 0,1 – 1,0 değerleri arasındaki analizlerde parametrelerin ulaştığı maksimum miktarlar

Parametreler	Noktasal Kaynak Alanları	$R_t: 0,1$	$R_t: 0,2$	$R_t: 0,3$	$R_t: 0,4$	$R_t: 0,5$	$R_t: 0,6$	$R_t: 0,7$	$R_t: 0,8$	$R_t: 0,9$	$R_t: 1,0$
Yuvarlanma mesafeleri (m)	1. Kaynak Alanı	22,153	23,998	29,008	31,295	39,831	51,639	97,157	169,982	157,405	296,910
	2. Kaynak Alanı	13,655	14,080	15,553	16,558	21,279	32,297	42,320	113,673	170,382	372,131
	3. Kaynak Alanı	16,423	16,544	16,708	24,282	31,008	51,150	68,272	94,633	163,057	210,298
	4. Kaynak Alanı	19,686	20,161	23,274	22,439	25,246	52,573	77,330	128,031	171,003	211,612
	5. Kaynak Alanı	21,072	26,778	27,303	40,486	44,871	43,782	69,185	74,204	92,714	117,727
Kinetik Enerji Miktarları (kJ)	1. Kaynak Alanı	161,33	161,33	161,33	161,33	161,33	172,86	231,16	449,01	447,04	587,9
	2. Kaynak Alanı	151,88	151,88	151,88	151,88	151,88	151,88	151,88	182,88	392,55	685,5
	3. Kaynak Alanı	197,87	197,87	197,87	197,87	197,87	197,87	197,87	197,87	398,97	667,04
	4. Kaynak Alanı	195,66	195,66	195,66	195,66	195,66	195,66	195,66	283,37	411,86	539,25
	5. Kaynak Alanı	112,41	112,41	112,41	123,46	135,9	151,71	170,4	192,53	302,54	390,1
Sıçrama Yükseklikleri (m)	1. Kaynak Alanı	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	10	10,56	9,25
	2. Kaynak Alanı	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	2,02	10,16	8,51
	3. Kaynak Alanı	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	5,29	10,89
	4. Kaynak Alanı	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	4,33	3,4	5,96	12,09
	5. Kaynak Alanı	2,81	3,14	3,63	4,08	4,36	4,54	4,66	4,75	5,58	10,26

Şekil 15'te tanjant (R_t) geri verme katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasında yapılan analizler kapsamında 1 numaralı noktasal kaynak alanında, düşen kaya bloğu; $R_t: 0,1$ değerinde 22,15 m ve $R_t: 0,6$ değerinde yaklaşık iki katından fazla artış göstererek 51,63 m yuvarlanma mesafesi kaydettiği belirlenmiştir. $R_t: 0,6$ ile 1,0 değerleri arasındaki analizler incelendiğinde $R_t: 0,9$ seviyesinde 0,8 seviyesine göre yuvarlanma mesafesinde azalma olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni, RocPro3D yazılımında iki analiz seviyesinde ($R_t: 0,8$ ve $0,9$) açılmal hızlar incelendiğinde, $R_t: 0,8$ için kaya bloğunun maksimum ulaştığı normal hız miktarı 23,84 m/s ve açılmal hızı 36,84 rad/s, $R_t: 0,9$ seviyesinde normal hız miktarı 24,88 m/s ve açılmal hızı 26,18 rad/s olarak tespit edilmiştir. Düşen kaya bloğunun $R_t: 0,9$ seviyesinde $R_t: 0,8$ seviyesine göre daha düşük açılmal hızı ulaştığından dolayı yuvarlanma mesafesinin daha düşük olduğu belirlenmiştir. $R_t: 1,0$ değerinde yapılan analizlerde yuvarlanma mesafesinde çok yüksek miktarlarda artış olduğu belirlenmiştir. R_t değeri 1,0 kullanılarak yapılan analizlerde serbest düşme hareketini tamamlayan kaya bloğunun yüzeye çarpması ve geri sıçraması sırasında enerji kaybına uğramadan hareketine devam ettiği varsayılmıştır. Gerçekte karşılaşılma ihtimali düşük olan bu durumda, düşen kaya bloğunun çarpma sonrası hızı ile çarpma öncesi hızı oranının bir ifadesi olan R_t katsayısının ($R_t: V_{it}/V_{it}$) 1 olması, hızların eşit olduğu ve çarpma etkisinin kaya bloğu üzerinde sönümleyici bir etkisinin olmadığını göstermektedir (Tablo 2).

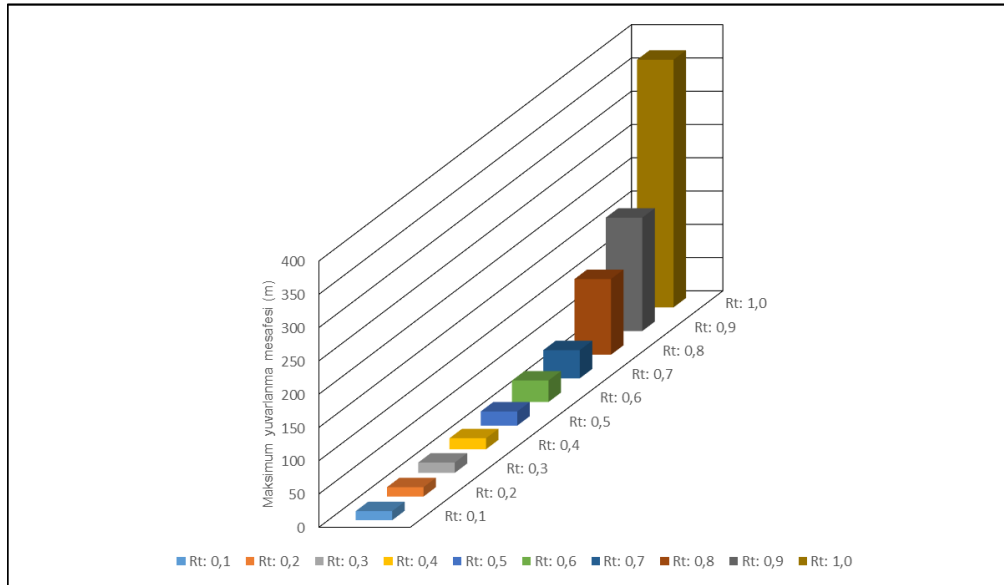
1 numaralı noktasal kaynak alanında maksimum kinetik enerji miktarı ve maksimum sıçrama yükseklikleri incelendiğinde, $R_t: 0,1$ ile $0,5$ arasında maksimum kinetik enerji miktarları sabit kalmış ve $R_t: 0,6$ seviyesinden itibaren artış göstermiştir. $R_t: 1,0$ seviyesinde 587,9 kJ ile en yüksek kinetik enerji miktarı kayıt altına alınmıştır. Maksimum sıçrama yüksekliklerinde de benzer bir durumla karşılaşmış ve $R_t: 0,7$ seviyesine kadar maksimum sıçrama yüksekliği 3,67 m olduğu tespit edilmiştir. $R_t: 0,8$ seviyesinden itibaren sıçrama yüksekliklerinde artış meydana gelmiş ve en yüksek maksimum sıçrama yüksekliğinin $R_t: 0,9$ seviyesinde 10,56 m olduğu belirlenmiştir. Yapılan analizlerde en yüksek parametre değerleri $R_t: 0,9$ ile 1,0 seviyelerinde kayıt altına alınmıştır (Tablo 2).

1 numaralı noktasal kaynak alanında yapılan analizlerde R_t katsayısının artışı ile birlikte her seviyede maksimum yuvarlanma mesafelerinde artış olduğu ve özellikle R_t katsayısının 0,6 değerinden itibaren artış miktarlarının arttığı tespit edilmiştir (Şekil 16). Yuvarlanma mesafelerinin aksine maksimum enerji miktarı ve maksimum sıçrama yüksekliklerinde ise belirli seviyelere kadar sabit değerlerin olduğu ve R_t katsayısının artması ile orantılı olarak artışın olmadığı tespit edilmiştir. Bundan dolayı tanjant (R_t) geri verme katsayısı 1 numaralı noktasal kaynak alanında maksimum yuvarlanma mesafeleri üzerinde direkt olarak etkili olduğu belirlenmiş ve kinetik enerji miktarları ve sıçrama yükseklikleri üzerinde belirli seviyelerden sonra etkili olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 16: 1 numaralı noktasal kaynak alanında tanjant (R_t) geri verme katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasındaki analizlerinde maksimum yuvarlanma mesafeleri

2 numaralı noktasal kaynak alanında R_t katsayısının farklı değerleri ile yapılan analizler kapsamında, R_t : 0,1 seviyesinde düşen kaya bloğu 13,65 m’de, R_t : 0,7 değerinde ise 42,32 m mesafe almıştır. R_t katsayısının 0,1 ile 0,7 seviyeleri arasında maksimum yuvarlanma mesafesi düşük miktarlarda artışların olduğu belirlenmiş ve R_t : 0,8 değerinden itibaren yüksek oranlarda artış tespit edilmiştir. R_t : 0,8 seviyesinde 113,67 m yuvarlanma mesafesine ulaşan blok, R_t : 1,0 seviyesinde çok yüksek miktarda artış göstermiş ve 372,13 m durma mesafesine ulaşmıştır (Tablo 2).



Şekil 17: 2 numaralı noktasal kaynak alanında tanjant (R_t) geri verme katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasındaki analizlerinde maksimum yuvarlanma mesafeleri

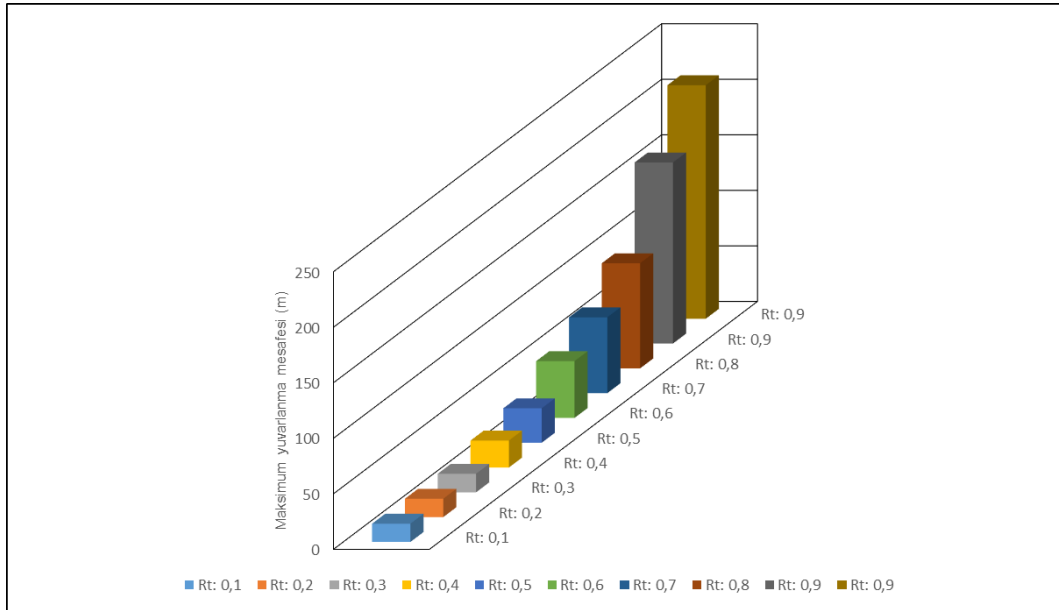
Maksimum kinetik enerji miktarlarında, R_t : 0,1 ile 0,7 seviyeleri arasında 151,88 kJ kinetik enerji miktarı değeri sabit kalmış ve artış veya azalış tespit edilememiştir. Yuvarlanma mesafelerinde olduğu gibi R_t : 0,8 seviyesinden itibaren maksimum kinetik enerji miktarlarında artış gözlenmiş ve R_t : 1,0 seviyesinde düşen kaya bloğu yuvarlanma hattı boyunca maksimum 685,5 kJ kinetik enerji miktarına ulaşmıştır. Tablo 2 incelendiğinde maksimum sıçrama yüksekliklerinde benzer durumun olduğu ve R_t : 0,8 değerinden itibaren kaya bloğunun sıçrama yüksekliklerinde artış meydana geldiği belirlenmiştir.

2 numaralı kaynak alanda yapılan analizlerde R_t katsayısının 0,1 ile 0,8 seviyeleri arasında parametrelerin maksimum ulaştıkları değerler incelendiğinde, yuvarlanma mesafelerinde çok düşük miktarlarda artış olduğu ve maksimum kinetik enerji miktarlarında ve maksimum sıçrama yüksekliklerinde değerlerin sabit kaldığı belirlenmiştir. R_t : 0,8 seviyesinden itibaren bütün parametrelerde yüksek miktarlarda artışların olduğu ve özellikle R_t : 1,0 seviyesinde düşen kaya bloğu geri sıçraması sırasında hızından kayıp olmaksızın hareketine devam ettiği belirlenmiştir (Şekil 17). Dolayısıyla R_t katsayısının maksimum yuvarlanma mesafesi üzerinde diğer parametrelere nazaran daha etkili olduğu tespit edilmiştir.

3 numaralı noktasal kaynak alanında yapılan analizlerde süreksizlik yüzeyleri boyunca ayrılan kaya bloğunun, R_t katsayısının 0,1 ile 0,3 seviyeleri arasında maksimum yuvarlanma mesafeleri 16 m civarında neredeyse sabit kalmış ve R_t : 0,4 değerinden itibaren artmaya başladığı tespit edilmiştir. R_t : 0,7 seviyesinden itibaren maksimum yuvarlanma mesafelerinde yüksek miktarlarda artışların olduğu belirlenmiştir (Şekil 18). En yüksek maksimum yuvarlanma mesafesi 210,29 m mesafe ile R_t : 1,0 seviyesinde kayıt altına alınmıştır (Tablo 2). Burada R_t : 1,0 seviyesinde 1 ve 2 numaralı kaynak alanlarında gerçekleşen çok yüksek miktarlarda ani artışın olmadığı tespit edilmiştir.

Maksimum kinetik enerji miktarları incelendiğinde R_t : 1,0 ile 0,8 seviyeleri arasında 197,87 kJ değeri sabit kaldığı belirlenmiştir. R_t : 0,9 seviyesinden itibaren maksimum kinetik enerji miktarında artış olduğu ve R_t : 1,0 seviyesinde düşen kaya bloğunun 685,5 kJ maksimum kinetik enerji değerine ulaştığı tespit edilmiştir. R_t katsayısının 0,1 ile 0,8 seviyeleri arasında 2,59 m maksimum sıçrama yüksekliğinde değişim gözlenmemiş ve maksimum kinetik enerji miktarında olduğu gibi R_t : 0,9 seviyesinden itibaren iki kattan fazla artış gösterdiği belirlenmiştir. 3 numaralı kaynak alanda parametrelerin maksimum değerleri R_t katsayısının 1,0 seviyesinde gerçekleştiği tespit edilmiştir.

3 numaralı kaynak alanda, 1 ve 2 numaralı kaynak alanda olduğu gibi R_t katsayısının en etkili olduğu parametrenin maksimum yuvarlanma mesafesi olduğu ve maksimum kinetik enerji miktarı ve maksimum sıçrama yüksekliğine R_t katsayısının yüksek değerlerinde etkili olduğu belirlenmiştir.



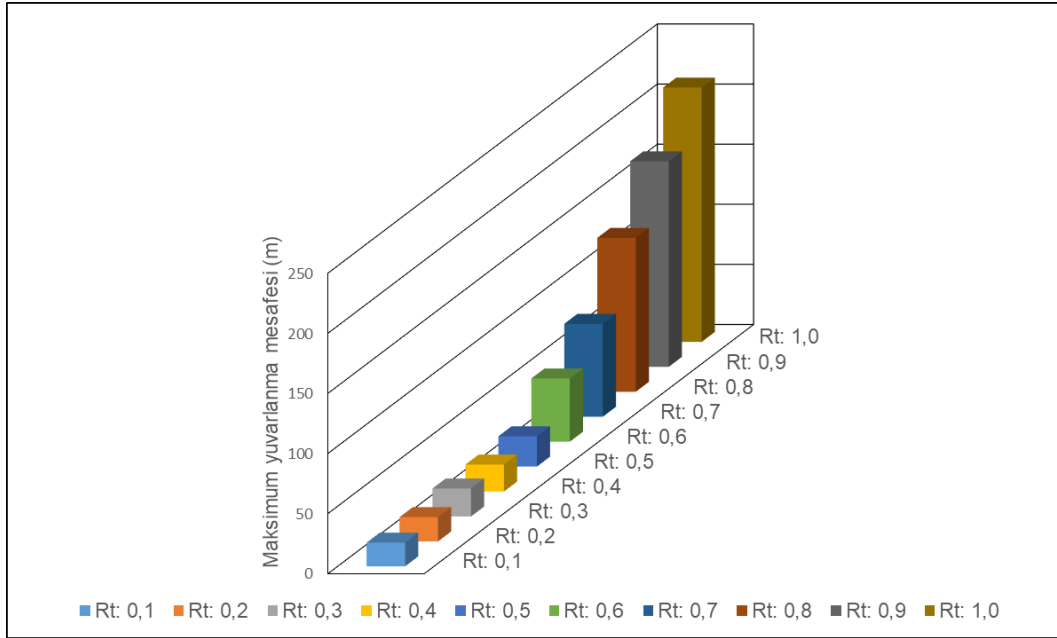
Şekil 18: 3 numaralı noktasal kaynak alanında tanjant (R_t) geri verme katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasındaki analizlerinde maksimum yuvarlanma mesafeleri

4 numaralı kaynak alanda R_t katsayılarının 0,1 ile 1,0 değerleri arasında yapılan analizlerde, R_t katsayısının değerinin artması ile maksimum yuvarlanma mesafesinin genel olarak artış gösterdiği belirlenmiştir. R_t : 0,1 seviyesinde 19,68 m mesafede durma noktasına ulaşan kaya bloğu, R_t : 0,5 seviyesinde 25,24 m maksimum yuvarlanma mesafesine ulaşmıştır. Maksimum yuvarlanma mesafesinde R_t : 0,5 seviyesine kadar düşük miktarlarda artışların olduğu belirlenmiş ve R_t : 0,6 seviyesinde 52,57 m mesafe ile iki kat fazla artış göstermiştir. R_t : 0,6 seviyesinden itibaren maksimum yuvarlanma mesafelerinde kayda değer artışların olduğu tespit edilmiştir (Şekil 19). R_t : 1,0 seviyesinde yapılan analizlerde düşen kaya bloğu 210,29 m maksimum yuvarlanma mesafesine ulaşmış ve diğer noktasal kaynak alanlarında olduğu gibi yüksek mesafelere ulaşmadığı belirlenmiştir.

Yapılan analizlerde, R_t katsayısının 0,1 ile 0,7 değerleri arasında 195,66 kJ maksimum kinetik enerji miktarı ile herhangi bir artış veya azalış tespit edilememiştir. R_t : 0,8 seviyesinden itibaren maksimum kinetik enerji miktarlarında yüksek miktarlarda artışların olduğu ve R_t : 0,9 seviyesinde yaklaşık iki kat artış meydana gelerek 411,86 kJ'lük kinetik enerji kayıt altına alınmıştır. R_t : 1,0 seviyesinde ise düşen kaya bloğu 539,25 kJ maksimum kinetik enerji miktarına ulaştığı belirlenmiştir (Tablo 2). RocPro3D yazılımında yapılan incelemeler neticesinde R_t : 0,9 ve 1,0 seviyelerinde yapılan analizlerde, kaya bloğu engele çarpıp yön değiştirmeden önce maksimum kinetik enerji miktarlarına ulaşmış ve engele çarptıktan sonra kinetik enerjisinin büyük bir bölümünü kaybettiği gözlenmiştir. Bu durum maksimum yuvarlanma mesafesini de etkileyerek kaya bloğunun çok yüksek durma mesafelerine ulaşmamasına neden olduğu tespit edilmiştir.

4 numaralı kaynak alana ait maksimum sıçrama yükseklikleri incelendiğinde, R_t : 0,6 seviyesine kadar 2,3 m sıçrama yüksekliğinin sabit kaldığı ve R_t : 0,7 seviyesinden itibaren artışların meydana geldiği tespit edilmiştir. R_t : 1,0 seviyesinde 12,09 m ile en yüksek sıçrama yüksekliğine ulaştığı belirlenmiştir (Tablo 2). R_t katsayısının 0,1 ile 1,0 arasındaki değerlerinde yapılan analizlerde, R_t : 0,7 seviyesinden itibaren farklı sıçrama yüksekliklerinin görülmesinin nedeni, R_t katsayısının artması ile düşen kaya bloğunun kinetik enerji miktarı artmakta ve yuvarlanma hattı değişmektedir. Bu nedenle çalışma sahasında daha önceden çok fazla düşmüş kaya bloğu bulunduğundan dolayı sürekli sıçrama yüksekliklerinin miktarının değişmekte olduğu gözlenmiştir.

4 numaralı noktasal kaynak alanında R_t katsayısının farklı değerleri ile yapılan analizlerde, R_t katsayısının en çok etkilediği parametrenin maksimum yuvarlanma mesafeleri olduğu ve R_t katsayısının yüksek değerlerinde maksimum yuvarlanma mesafeleri ve maksimum sıçrama yüksekliklerinin de etkilendiği tespit edilmiştir.

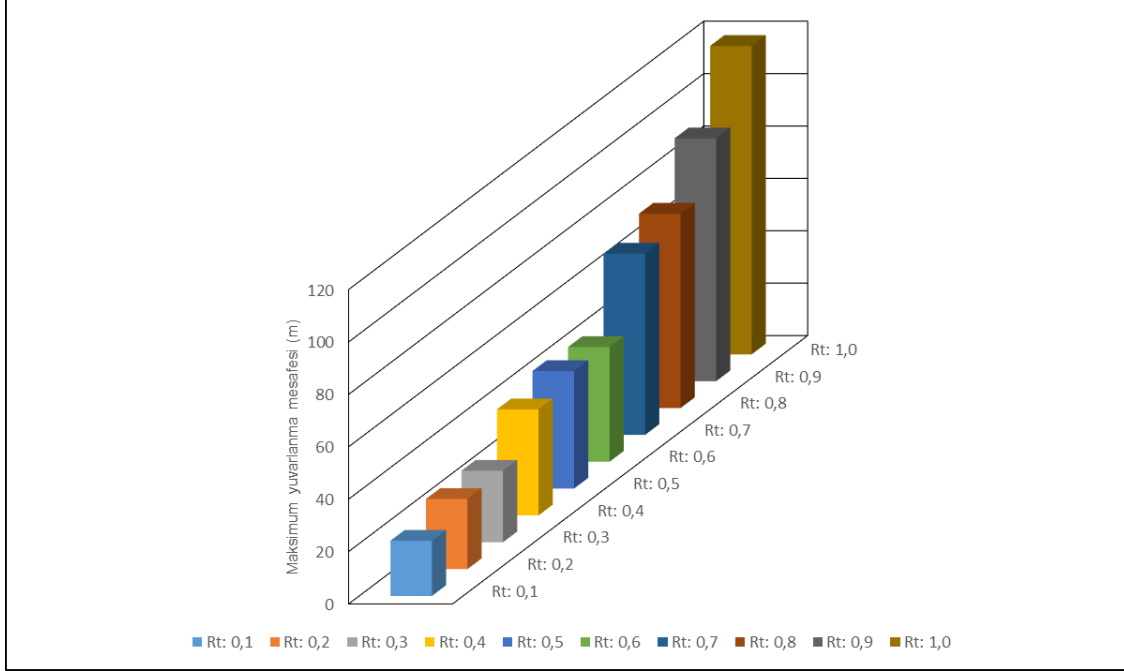


Şekil 19: 4 numaralı noktasal kaynak alanında tanjant (R_t) geri verme katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasındaki analizlerinde maksimum yuvarlanma mesafeleri

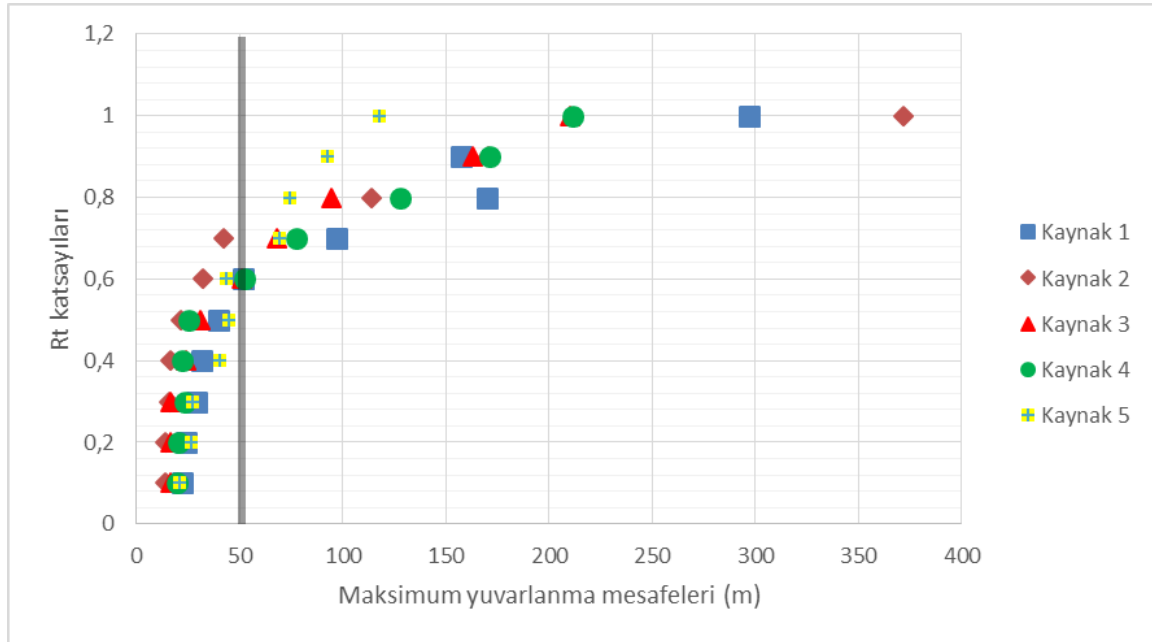
5 numaralı kaynak alanda sayısal yüzey modeli üzerinde yapılan kaya düşme analizlerinde, R_t : 0,1 seviyesinde 21,07 m ve R_t : 0,6 seviyesinde 43,78 m mesafede durma mesafesine ulaştığı belirlenmiştir. R_t : 0,1 ile 0,6 seviyeleri arasında maksimum yuvarlanma mesafelerinde küçük miktarlarda artışların olduğu ve R_t : 0,7 seviyesinden itibaren değerlerin daha da arttığı tespit edilmiştir (Şekil 20). R_t : 1,0 seviyesinde 117,72 m maksimum yuvarlanma mesafesine ulaşan blok, 4 numaralı kaynak alanda olduğu gibi, R_t : 0,9 ile 1,0 seviyelerinde yuvarlanma hattında bir engele çarparak kinetik enerjisini kaybettiği belirlenmiştir. Bundan dolayı 5 numaralı noktasal kaynak alanları, diğer kaynak alanlarına göre en düşük maksimum yuvarlanma mesafelerine sahip olduğu gözlenmiştir (Tablo 2).

5 numaralı noktasal kaynak alanında yapılan analizlerden elde edilen verilerde, R_t : 0,1 ile 0,3 seviyeleri arasında 112,41 kJ maksimum kinetik enerji miktarında değişim gözlenmemiştir. Diğer kaynak alanlarının aksine, R_t : 0,4 değerinden itibaren maksimum kinetik enerji miktarlarında artışların olduğu ve R_t : 1,0 seviyesinde 390,1 kJ maksimum kinetik enerji miktarı kayıt altına alınmıştır (Tablo 2). 5 numaralı noktasal kaynak alan maksimum kinetik enerji miktarlarında en düzenli artışların ve R_t katsayısının kinetik enerji miktarını en çok etkilediği kaynak alan olduğu belirlenmiştir. Maksimum sıçrama yükseklikleri incelendiğinde, R_t katsayısının 0,1 seviyesinden itibaren sıçrama yüksekliklerinde artışların olduğu gözlenmiştir. R_t : 0,1 seviyesinde 2,81 m olan sıçrama yüksekliği, R_t : 0,8 seviyesine kadar küçük miktarlarda artışlar gösterdiği belirlenmiştir. Maksimum sıçrama yüksekliklerinde R_t : 1,0 seviyesinde, R_t : 0,9 seviyesine göre yaklaşık iki kat artış meydana gelerek 10,26 m olarak tespit edilmiştir.

4 numaralı noktasal kaynak alanda olduğu gibi R_t katsayısı arttıkça kinetik enerji miktarı artan kaya bloğunun yuvarlanma hattında farklılıklar oluşmuş ve sıçrama yüksekliklerinde de artışların olduğu belirlenmiştir. 5 numaralı noktasal kaynak alanda, R_t katsayısının artması ile bütün parametreler etkilenmiş ve en çok etkilenen parametrenin maksimum yuvarlanma mesafeleri olduğu belirlenmiştir. Genel olarak noktasal kaynak alanları arasında en düzenli artışların olduğu ve bütün parametrelerin etkilendiği kaynak alanının, 5 numaralı noktasal kaynak alanı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 20: 5 numaralı noktasal kaynak alanında tanjant (R_t) geri verme katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasındaki analizlerinde maksimum yuvarlanma mesafeleri



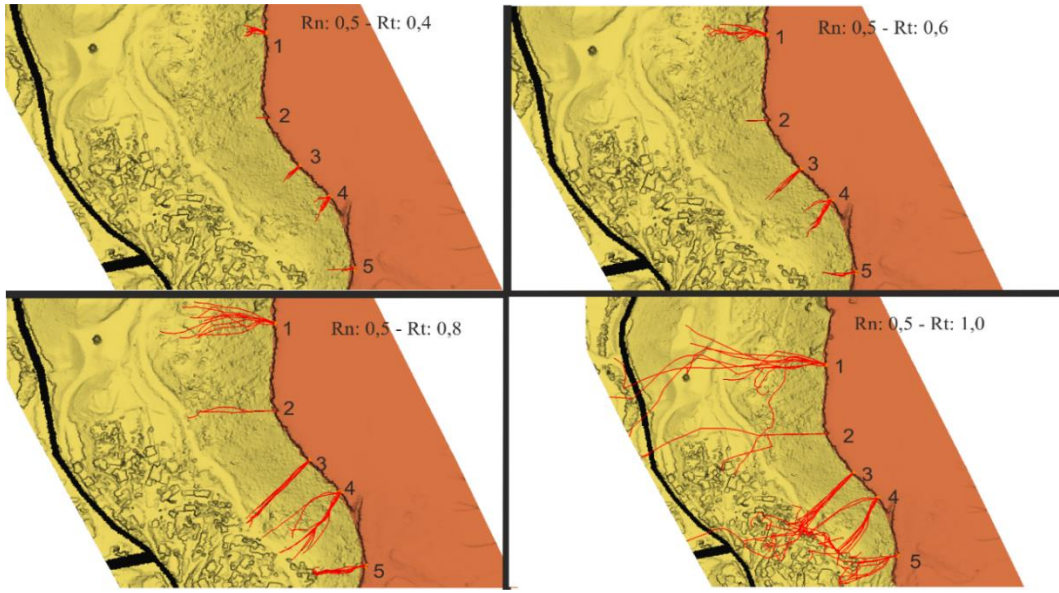
Şekil 21: 5 adet noktasal kaynak alana ait maksimum yuvarlanma mesafeleri ile R_t değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren dağılım grafiği

R_t katsayılarının 0,1 ile 1,0 değerleri arasında 0,1'er artış ile her kademede ve 5 farklı noktasal kaynak alanında yapılan analizler neticesinde, Şekil 21'de verilen R_t katsayıları ile 5 farklı kaynak zonunun maksimum yuvarlanma mesafeleri arasındaki dağılım grafiği incelendiğinde, R_t katsayısının 0,6 ve 0,7 seviyelerinden itibaren maksimum yuvarlanma mesafelerinin arttığı gözlenmiştir.

R_t katsayısının 0,1 ile 0,6 seviyeleri arasında maksimum yuvarlanma mesafelerinde küçük miktarlarda artışların olduğu ve düşen kaya bloklarının durma mesafelerinin yüksek olmadığı tespit edilmiştir. Bütün kaynak alanlarında genellikle R_t katsayısının 0,6 – 0,7 seviyelerinden itibaren maksimum yuvarlanma mesafelerinde ciddi artışların olduğu ve kaya bloğunun çok yüksek miktarda durma mesafelerine sahip olduğu belirlenmiştir. Özellikle R_t : 1,0 seviyesinde yapılan analizlerde maksimum yuvarlanma mesafeleri yüksek miktarlara ulaşmış ve bu seviyedeki analizlerin gerçeklikten uzaklaştığı tespit edilmiştir. Çünkü kaynak zondan süreksizlik yüzeyleri boyunca duraylılığını kaybederek harekete geçen kaya bloğu, serbest düşme hareketini tamamladıktan sonra çarpma etkisi altında kinetik enerjisinden hiç kayıp olmaksızın hareketine devam ettiği tespit edilmiştir. Genel olarak kaya düşme sahalarında sayısal yüzey modelleri üzerinde yapılacak kaya düşme analizlerinde R_t katsayısının doğru ve sahaya en uygun değerde seçilmesi, bu sahalarda kaya düşme mekanizmasının en net şekilde anlaşılabilmesi ve iyileştirme çalışmalarının doğru bir şekilde yapılabilmesini sağlamaktadır. Çünkü R_t katsayısının sahaya uygun seçilemediği durumlarda parametrelerde oluşabilecek farklılıklar net bir şekilde ortaya konulmuştur. Dolayısıyla R_t katsayısının maksimum yuvarlanma mesafeleri üzerinde direkt olarak etkili olduğu belirlenmiştir.

Tablo 3: Noktasal kaynak alanlarına ait yanal saçılım oranları

Parametreler	Noktasal Kaynak Alanları	R_t : 0,1	R_t : 0,2	R_t : 0,3	R_t : 0,4	R_t : 0,5	R_t : 0,6	R_t : 0,7	R_t : 0,8	R_t : 0,9	R_t : 1,0
1 numaralı noktasal kaynak alanı	En uzak iki düşme hattı arasındaki mesafe (D) (m)	8,09	10,16	14,08	17,26	24,48	36,08	38,48	55,15	128,05	312,08
	Yuvarlanma mesafesi (L) (m)	20,69	23,28	28,46	33,58	46,68	92,52	102,60	164,04	210,52	389,78
	Yanal saçılım oranı	0,39	0,44	0,49	0,51	0,52	0,39	0,38	0,34	0,61	0,80
2 numaralı noktasal kaynak alanı	En uzak iki düşme hattı arasındaki mesafe (D) (m)	3,53	3,81	3,31	3,06	3,84	1,75	56,21	19,74	69,83	132,74
	Yuvarlanma mesafesi (L) (m)	16,43	17,34	18,27	19,05	24,51	33,47	97,85	127,37	224,29	317,85
	Yanal saçılım oranı	0,21	0,22	0,18	0,16	0,16	0,05	0,57	0,16	0,31	0,42
3 numaralı noktasal kaynak alanı	En uzak iki düşme hattı arasındaki mesafe (D) (m)	12,16	15,00	19,47	16,35	21,27	23,78	28,31	16,11	66,78	226,22
	Yuvarlanma mesafesi (L) (m)	17,27	17,74	21,95	25,06	35,17	52,02	67,73	91,22	144,30	300,12
	Yanal saçılım oranı	0,70	0,85	0,89	0,65	0,60	0,46	0,42	0,18	0,46	0,75
4 numaralı noktasal kaynak alanı	En uzak iki düşme hattı arasındaki mesafe (D) (m)	18,24	20,17	24,62	36,19	45,43	48,46	26,03	62,18	63,41	139,55
	Yuvarlanma mesafesi (L) (m)	16,66	17,30	19,96	26,03	35,04	42,52	69,11	112,69	108,68	161,15
	Yanal saçılım oranı	1,10	1,17	1,23	1,39	1,30	1,14	0,38	0,55	0,58	0,87
5 numaralı noktasal kaynak alanı	En uzak iki düşme hattı arasındaki mesafe (D) (m)	10,02	13,12	15,78	24,06	28,15	31,48	21,47	12,56	43,19	113,58
	Yuvarlanma mesafesi (L) (m)	20,36	26,25	26,63	39,77	42,84	49,32	65,27	74,34	89,60	134,13
	Yanal saçılım oranı	0,49	0,50	0,59	0,60	0,66	0,64	0,33	0,17	0,48	0,85



Şekil 22: Saçılım miktarlarının belirlenebilmesi için kaynaklardan 10 adet blok düşürülmesi sonucunda kaya bloklarının izlediği hatlar ($R_n:0,5$, $R_t:0,4-0,6-0,8-1,0$)

Yanal saçılım etkisi, topoğrafyanın pürüzlülüğü tarafından etkilense de çalışma kapsamında arazi geri verme (R_n ve R_t) katsayılarının yanal saçılım oranları üzerindeki etkisinin ortaya konulması amaçlanmıştır. Yanal saçılım oranlarını hesaplayabilmek için her noktasal kaynak alanından 10 adet kaya bloğu düşürülerek R_t katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasında analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 22). Yapılan analizler neticesinde Tablo 3’de görüldüğü üzere, 1 numaralı kaynak alanda R_t katsayısı arttıkça en uzak iki düşme hattı arasındaki mesafesinin de arttığı belirlenmiştir. Ayrıca R_t katsayısının yanal saçılım oranına etkisinin yuvarlanma mesafesi kadar olmadığı tespit edilmiştir. 2 ve 3 numaralı kaynak alanda yanal saçılım oranlarında düzensiz bir veri setinin olduğu ve R_t katsayısının yanal saçılım oranı üzerinde etkisi belirlenememiştir. 4 numaralı kaynak alanın verileri incelendiğinde, yanal saçılım oranının en yüksek olduğu ve genellikle R_t katsayısının düşük değerlerinde yüksek oranlara sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca R_t katsayısının değeri arttıkça yuvarlanma mesafesi, en uzak iki düşme hattı arasındaki mesafeye göre daha çok arttığından dolayı R_t katsayısı yuvarlanma mesafesine daha çok etki ettiği gözlenmiştir. 5 numaralı kaynak alanda yanal saçılım oranlarında düzenli bir veri setinin olmadığı belirlenmiştir. Genel olarak verilere bakıldığında, R_t katsayısının yanal saçılım oranlarına, yuvarlanma mesafelerinde olduğu gibi direkt olarak etkili olmadığı belirlenmiştir. Çünkü R_t katsayısının artması ile yanal saçılım oranlarında düzenli bir artış veya azalış belirlenememiştir.

3.2. Normal (R_n) Geri Verme Katsayısının Etkisi

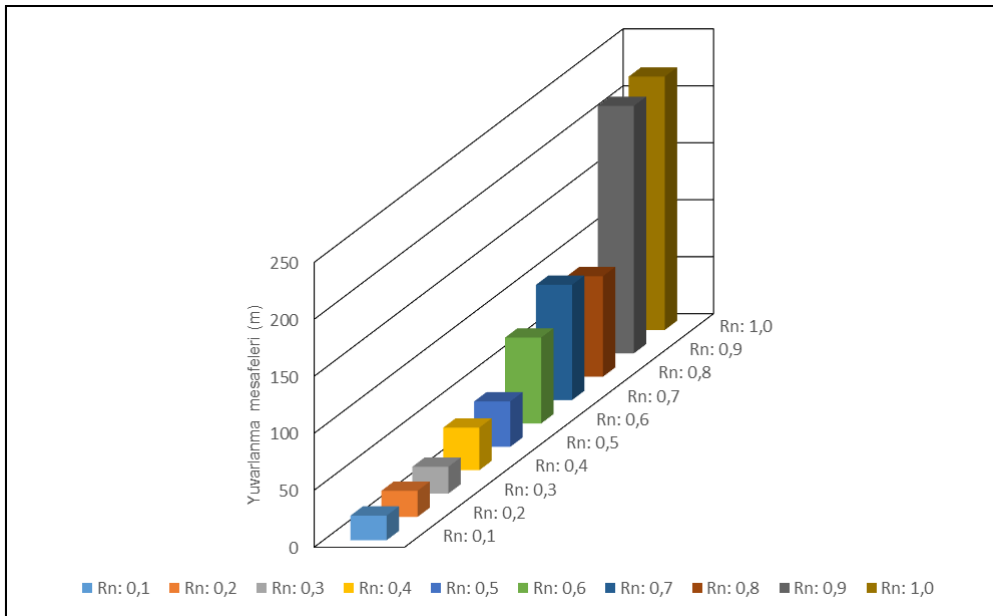
Yapılan analizlerde tanjant geri verme katsayısı (R_t) 0,5 değerinde sabit tutularak normal geri verme katsayısı (R_n) 0,1 ile 1,0 değerleri arasında 0,1’lik miktarlarda artırılarak her kademede analizler bütün noktasal kaynak alanları için tekrarlanmıştır (Şekil 24).

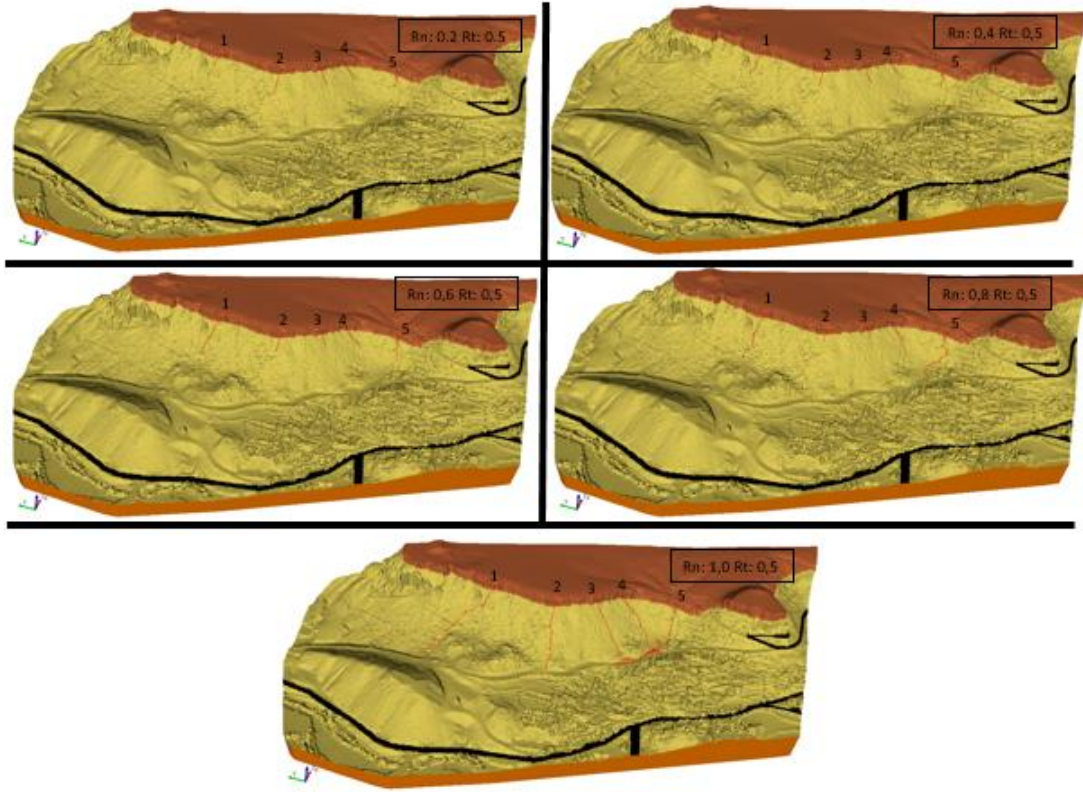
1 numaralı noktasal kaynak alanında yapılan analizlerde Tablo 4’de görüldüğü üzere R_n : 0,1 seviyesinde 21,61 m ve R_n : 0,7 seviyesinde 75,35 m maksimum yuvarlanma mesafesi gözlenmiştir. R_n katsayısının 0,1 ile 0,7 değerleri arasında maksimum yuvarlanma mesafelerinde devamlı artış olduğu belirlenmiştir. Özellikle R_n : 0,5 değerinden itibaren artış miktarlarının yüksek miktarlarda olduğu gözlenmiştir. R_n : 0,8 seviyesinde 88,24 m ile R_n : 0,7 seviyesine göre azalış olduğu tespit edilmiştir. Düşen kaya bloğu R_n : 0,8 seviyesine göre R_n : 0,9 seviyesinde iki kattan fazla artış göstererek 217,15 m durma mesafesine ulaştığı belirlenmiş ve R_n : 1,0 seviyesinde 222,38 m maksimum yuvarlanma mesafesine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Maksimum kinetik enerji miktarları incelendiğinde, R_n : 0,1 ile 0,5 seviyeleri arasında 161,33 kJ değeri sabit kaldığı ve herhangi bir artış veya azalışın olmadığı belirlenmiştir. R_n : 0,6 seviyesinden itibaren maksimum kinetik enerji miktarlarında artışların olduğu ve R_n : 0,8 seviyesinde 354,76 kJ değerinin en yüksek maksimum kinetik enerji miktarı olduğu gözlenmiştir. R_n : 0,9 ve 1,0 seviyelerinde kinetik enerji miktarlarında azalışların olduğu tespit edilmiştir. 1 numaralı kaynak alanı için maksimum kinetik enerji miktarlarında düzensiz bir veri seti olduğu belirlenmiştir. Maksimum sıçrama yüksekliklerinde ise kinetik enerji miktarlarına benzer şekilde R_n : 0,1 ile 0,5 değerleri arasında herhangi bir değişim gözlenmemiştir. R_n : 0,5 seviyesinden itibaren maksimum sıçrama yüksekliklerinde artışların olduğu ve R_n : 0,9 seviyesinde 10,57 m ile en yüksek değerin kayıt altına alındığı belirlenmiştir. Genel olarak 1 numaralı kaynak alanda parametrelerin değerlerinde düzenli bir veri setinin olmadığı ve R_n katsayısının 0,5 değerinden itibaren parametrelerde ciddi artışların olduğu belirlenmiştir (Şekil 23).

Tablo 4: 5 noktasal kaynak alanında normal (R_n) geri verme katsayısının 0,1 – 1,0 değerleri arasındaki analizlerde parametrelerin ulaştığı maksimum miktarlar

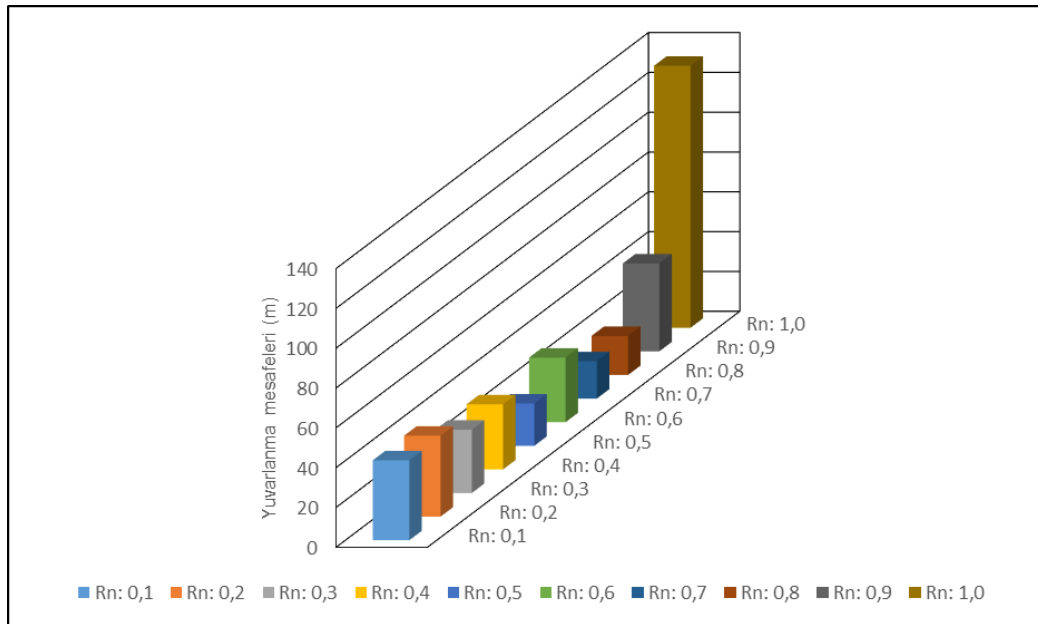
Parametreler	Noktasal Kaynak Alanları	$R_n: 0,1$	$R_n: 0,2$	$R_n: 0,3$	$R_n: 0,4$	$R_n: 0,5$	$R_n: 0,6$	$R_n: 0,7$	$R_n: 0,8$	$R_n: 0,9$	$R_n: 1,0$
Yuvarlanma mesafesi (m)	1. Kaynak Alanı	21,611	22,890	23,494	37,321	39,831	75,351	101,168	88,243	217,157	222,384
	2. Kaynak Alanı	40,171	40,654	31,807	32,711	21,279	32,441	18,771	19,653	44,182	131,61
	3. Kaynak Alanı	31,017	32,183	30,560	31,417	31,008	24,670	24,706	19,395	22,279	181,991
	4. Kaynak Alanı	29,721	29,581	25,587	26,625	25,246	46,182	42,509	58,069	130,352	314,121
	5. Kaynak Alanı	23,986	30,576	29,881	36,374	44,871	49,163	56,737	127,909	103,644	309,413
Kinetik Enerji Miktarları (kJ)	1. Kaynak Alanı	161,33	161,33	161,33	161,33	161,33	172,54	288,3	354,76	315,66	292,28
	2. Kaynak Alanı	151,88	151,88	151,88	151,88	151,88	151,88	151,88	151,88	151,88	151,88
	3. Kaynak Alanı	197,87	197,87	197,87	197,87	197,87	197,87	197,87	197,87	197,87	197,87
	4. Kaynak Alanı	195,66	195,66	195,66	195,66	195,66	195,66	195,66	195,66	195,66	376,29
	5. Kaynak Alanı	112,41	112,41	112,41	127,65	135,9	146,14	163,7	264,02	260,06	396,36
Sıçrama Yükseklikleri (m)	1. Kaynak Alanı	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	4,45	5,13	10,32	10,57	9
	2. Kaynak Alanı	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	2,82
	3. Kaynak Alanı	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,64
	4. Kaynak Alanı	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	5,51	12,19
	5. Kaynak Alanı	2,81	2,81	3,02	3,73	4,36	4,94	5,48	11,88	11,26	27,46

Şekil 23: 1 numaralı noktasal kaynak alanında normal (R_n) geri verme katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasındaki analizlerinde maksimum yuvarlanma mesafeleri



Şekil 24: Kaya düşme analizi sonucu R_n : 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0 ve R_t : 0,5 değerlerinde düşen kaya bloklarının yuvarlanma hattı

Yapılan analizlerde 2 numaralı noktasal kaynak alanında, R_n : 0,1 seviyesinde 40,17 m, R_n : 0,3 seviyesinde 32,71 m ve R_n : 0,9 seviyesinde 19,65 m olarak gözlenmiştir. R_n katsayısının 0,1 ile 0,8 seviyeleri arasında düzenli bir artış veya azalışın olmadığı belirlenmiştir. Düşen kaya bloğunun R_n : 1,0 seviyesinde, R_n : 0,9 seviyesine göre yüksek bir artış meydana gelerek 131,61 m maksimum yuvarlanma mesafesine ulaştığı tespit edilmiştir. Şekil 25’de görüldüğü üzere 2 numaralı kaynak alan için R_n katsayısının artması ile maksimum yuvarlanma mesafesinde düzenli bir artış veya azalışın olmadığı belirlenmiştir (Tablo 4).

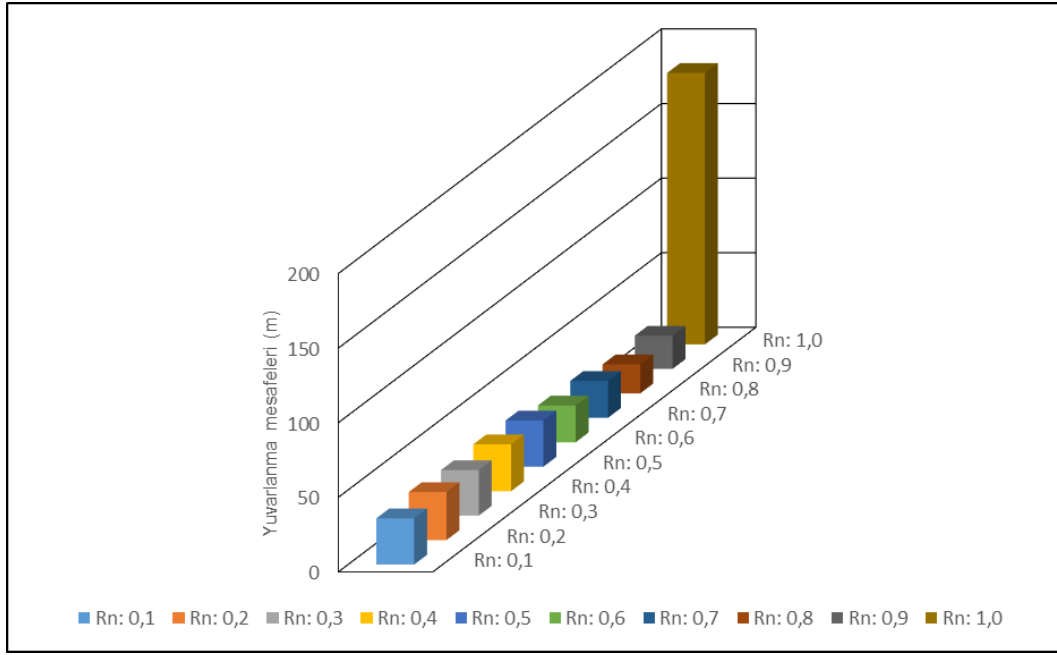


Şekil 25: 2 numaralı noktasal kaynak alanında normal (R_n) geri verme katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasındaki analizlerinde maksimum yuvarlanma mesafeleri

2 numaralı noktasal kaynak alanında maksimum kinetik enerji miktarlarında herhangi bir değişim gözlenmemiş ve R_n : 0,1 ile 1,0 değerleri arasında 151,88 kJ kinetik enerji miktarı tespit edilmiştir. Maksimum sıçrama yüksekliklerinde ise düşen kaya bloğu, R_n : 0,1 ile 0,9 seviyeleri arasında 1,36 m sıçrama yüksekliği değeri sabit kalmış ve R_n : 1,0 seviyesinde 2,82 m değere ulaşmıştır (Tablo 4). Genel olarak verilere bakıldığında R_n katsayısının 2 numaralı noktasal kaynak alanında parametreler üzerinde düzenli bir veri seti oluşturmadığı belirlenmiştir.

3 numaralı noktasal kaynak alanında yapılan analizlerde, 2 numaralı noktasal kaynak alanında olduğu gibi maksimum yuvarlanma mesafelerinde R_n : 0,1 ile 0,9 seviyeleri arasında küçük miktarlarda değişimlerin olduğu ve R_n katsayısının 0,5 seviyesinden 0,9 seviyesine kadar kaya bloğunun durma mesafelerinde azalmaların olduğu belirlenmiştir. Şekil 26'de görüldüğü üzere R_n : 1,0 seviyesinde ise çok yüksek bir artış ile 181,99 m maksimum yuvarlanma mesafesi gözlenmiş ve analizin bu seviyede gerçeklikten uzaklaştığı belirlenmiştir.

Yapılan analizlerde maksimum kinetik enerji miktarlarında 2 numaralı noktasal kaynak alanında olduğu gibi 197,87 kJ değeri sabit kalmış ve herhangi bir değişimin olmadığı gözlenmiştir. Maksimum sıçrama yüksekliklerinde ise R_n : 0,1 ile 0,9 seviyeleri arasında 2,59 m değeri sabit kalmış ve R_n : 1,0 seviyesinde çok düşük bir artış ile 2,64 m değerine ulaşmıştır (Tablo 4). 3 numaralı noktasal kaynak alanında R_n katsayısının artması ile birlikte parametrelerde artış veya azalışın olduğu düzenli bir veri setinin olmadığı belirlenmiştir.



Şekil 26: 3 numaralı noktasal kaynak alanında normal (R_n) geri verme katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasındaki analizlerinde maksimum yuvarlanma mesafeleri

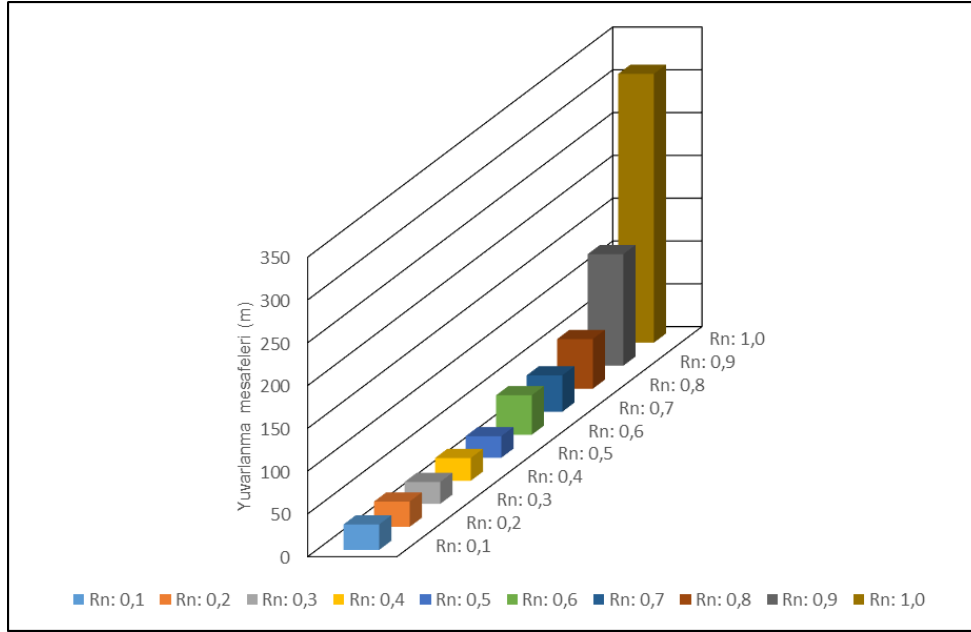
4 numaralı noktasal kaynak alanında yapılan analizlerde R_n : 0,1 seviyesinde 29,72 m olarak kayıt altına alınan maksimum yuvarlanma mesafesi, R_n : 0,7 seviyesine kadar düzenli bir artışın olmadığı gözlenmiştir. R_n : 0,7 seviyesinden itibaren kaya bloğunun durma mesafelerinde artışların olduğu ve R_n : 1,0 seviyesinde çok yüksek bir artış ile 314,12 m maksimum yuvarlanma mesafesi kayıt altına alınmıştır (Şekil 27).

Tablo 4'de görüldüğü üzere R_n katsayısının 0,9 seviyesine kadar 195,66 kJ değer ile maksimum kinetik enerji miktarlarında herhangi bir değişim gözlenmemiştir. R_n : 1,0 seviyesinde 376,29 kJ değer ile 4 numaralı noktasal kaynak alanı için en yüksek maksimum kinetik enerji miktarı kayıt altına alınmıştır. R_n katsayısının 0,1 ile 0,8 seviyeleri arasında maksimum sıçrama yüksekliklerinde herhangi bir değişim gözlenmemiştir. R_n : 0,9 seviyesinden itibaren artış gösteren maksimum sıçrama yükseklikleri, R_n : 1,0 seviyesinde çok yüksek bir miktarda artış göstererek 12,19 m yüksekliğe ulaştığı belirlenmiştir (Tablo 4). Genel olarak 4 numaralı noktasal kaynak alanı için 2 ve 3 numaralı kaynak alanlarında olduğu gibi parametrelerin değerlerinde düzenli bir veri setine rastlanmamıştır. R_n : 1,0 seviyesinde analizin gerçeklikten uzaklaştığı belirlenmiştir.

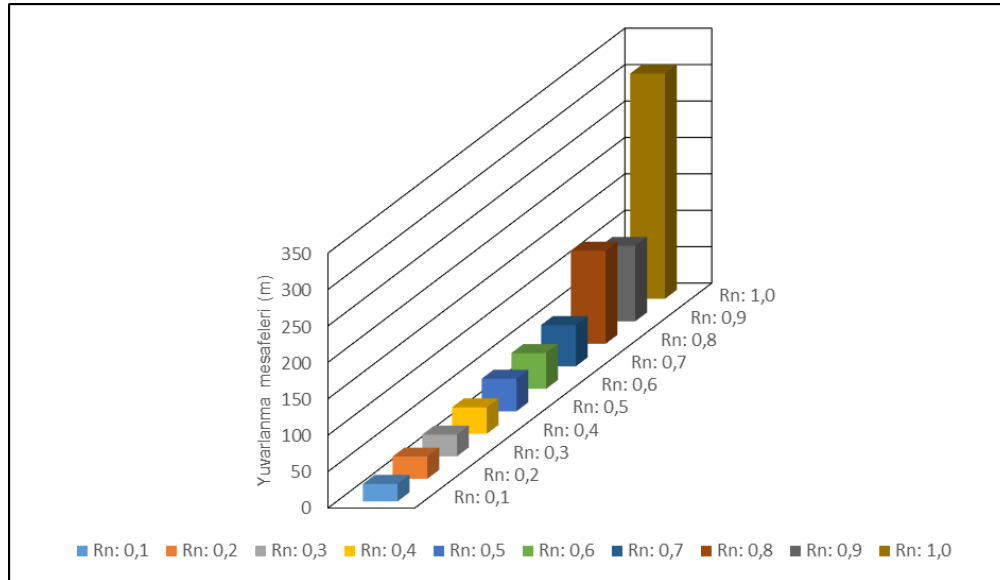
Yapılan analizler kapsamında 5 numaralı noktasal kaynak alanından düşen kaya bloğu, R_n : 0,1 seviyesinden itibaren R_n : 1,0 seviyesine kadar maksimum yuvarlanma mesafelerinde genellikle artış gösterdiği gözlenmiştir. R_n : 0,9 seviyesinde 130,35 m durma mesafesine sahip kaya bloğu, R_n : 1,0 seviyesinde yaklaşık 3 kat artış göstererek 309,41 m mesafeye ulaştığı belirlenmiştir. Dolayısıyla R_n : 1,0 seviyesinde analiz her ne kadar gerçeklikten uzaklaşsa da, 5 numaralı noktasal kaynak alanı, diğer kaynak alanlarına nazaran en düzenli veri setine ve artışa sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 28).

Maksimum kinetik enerji miktarları incelendiğinde, R_n : 0,1 ile 0,3 seviyeleri arasında 112,41 kJ değer sabit kalmış ve R_n : 0,3 seviyesinden itibaren sürekli olarak artış gösterdiği belirlenmiştir. R_n : 0,9 seviyesinde 260,06 kJ olan kinetik enerji miktarı, R_n : 1,0 seviyesinde yüksek bir artış göstererek 396,36 kJ değere ulaştığı gözlenmiştir (Tablo 4). Diğer kaynak alanlara nazaran kinetik enerji miktarında en düzenli artışlar 5 numaralı noktasal kaynak alanında tespit edilmiştir. Maksimum sıçrama yükseklikleri ise R_n : 0,2 değerinden itibaren artış göstermiş ve R_n : 0,7 seviyesinde 5,48 m olarak kayıt altına alınmıştır. R_n : 0,8 seviyesinde yüksek bir artış göstererek 11,88 m yüksekliğe ulaşan kaya bloğu, R_n : 1,0 seviyesinde 27,46 m maksimum sıçrama yüksekliğine ulaşarak analizin gerçeklikten uzaklaştığı belirlenmiştir (Tablo 4).

Genel olarak 5 numaralı kaynak alan, diğer kaynak alanlara nazaran R_n katsayısının değerinin artması ile birlikte parametrelerde en düzenli veri setini oluşturduğu belirlenmiştir. Fakat R_n katsayısının 1,0 değerinde parametrelerde ani artışların ve çok yüksek değerlerin olmasından dolayı analizin gerçeklikten uzaklaştığı gözlenmiştir.



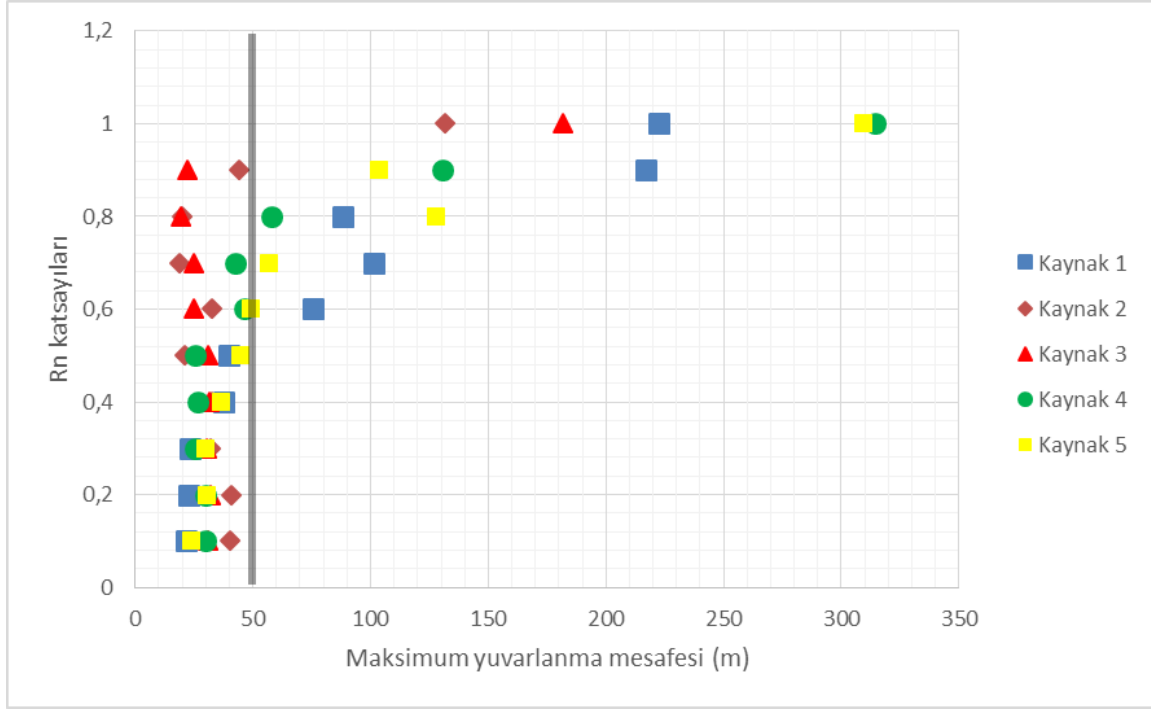
Şekil 27: 4 numaralı noktasal kaynak alanında normal (R_n) geri verme katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasındaki analizlerinde maksimum yuvarlanma mesafeleri



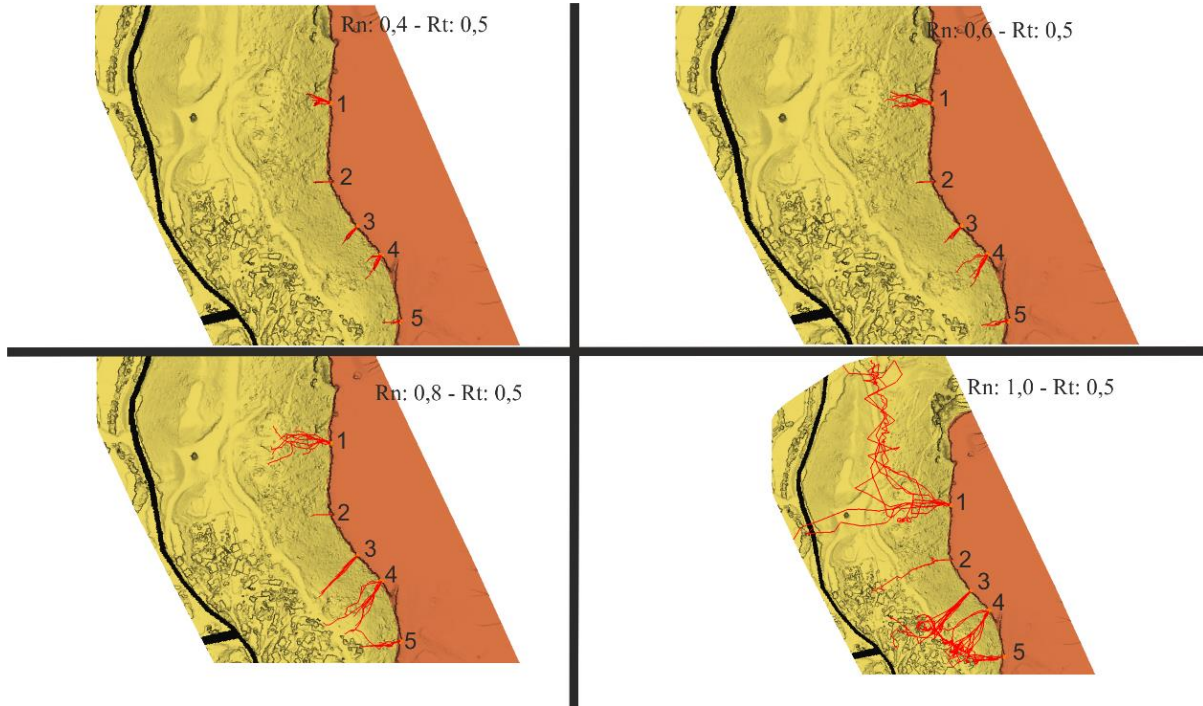
Şekil 28: 5 numaralı noktasal kaynak alanında normal (R_n) geri verme katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasındaki analizlerinde maksimum yuvarlanma mesafeleri

Normal (R_n) geri verme katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasında yapılan analizlerde, Şekil 29'de verilen dağılım grafiğinde görüldüğü üzere, R_n katsayısının 0,8 değerinden itibaren maksimum yuvarlanma mesafelerinde yüksek artışların olduğu belirlenmiştir.

Fakat maksimum yuvarlanma mesafelerinin artışa başladığı R_n katsayısının seviyesi 5 noktasal kaynak alanında farklı değerler olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla R_n katsayıları parametreler üzerinde düzenli bir veri seti oluşturmadığı ve parametreler üzerinde R_t katsayısı kadar etkili olmadığı belirlenmiştir. Özellikle maksimum yuvarlanma mesafelerinde R_t katsayısı R_n katsayısına nazaran daha etkili olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 29: 5 adet noktasal kaynak alana ait maksimum yuvarlanma mesafeleri ile R_n değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren dağılım grafiği



Şekil 30: Saçılım miktarlarının belirlenebilmesi için kaynaklardan 10 adet blok düşürülmesi sonucunda kaya bloklarının izlediği hatlar (R_n : 0,4-0,6-0,8-1,0, R_t : 0,5)

Şekil 30'da görüldüğü üzere bütün noktasal kaynak alanlarından 10 adet kaya bloğu düşürülerek R_n katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasında yapılan analizlerde yanal saçılım oranları hesaplanmıştır.

Tablo 5’de görüldüğü üzere 1 numaralı noktasal kaynak alanında R_n katsayısının 0,8 seviyesinden itibaren yanal saçılım oranları artmış olup R_n katsayısının yüksek değerlerinde yanal saçılım oranına etki ettiği tespit edilmiştir. 3, 4 ve 5 numaralı noktasal kaynak alanlarının yanal saçılım oranları incelendiğinde, en uzak iki düşme hattı arasındaki mesafenin genellikle artış gösterdiği fakat yanal saçılım oranlarında düzenli bir artış veya azalışın olmadığı belirlenmiştir. Dolayısıyla 2, 3, 4 ve noktasal kaynak alanlarında R_n katsayısının yanal saçılım oranına etki etmediği tespit edilmiştir.

Tablo 5: Noktasal kaynak alanlarına ait yanal saçılım oranları

Parametreler	Noktasal Kaynak Alanları	$R_n: 0,1$	$R_n: 0,2$	$R_n: 0,3$	$R_n: 0,4$	$R_n: 0,5$	$R_n: 0,6$	$R_n: 0,7$	$R_n: 0,8$	$R_n: 0,9$	$R_n: 1,0$
1 numaralı noktasal kaynak alanı	En uzak iki düşme hattı arasındaki mesafe (D) (m)	12,92	14,39	25,37	24,90	24,48	40,29	52,06	76,19	196,77	466,96
	Yuvarlanma mesafesi (L) (m)	25,78	28,52	46,84	47,08	46,68	81,25	95,62	116,03	176,08	380,07
	Yanal saçılım oranı	0,50	0,50	0,54	0,53	0,52	0,50	0,54	0,66	1,12	1,23
2 numaralı noktasal kaynak alanı	En uzak iki düşme hattı arasındaki mesafe (D) (m)	11,07	8,20	2,30	2,70	3,84	5,80	10,75	21,74	66,30	83,31
	Yuvarlanma mesafesi (L) (m)	39,38	39,91	33,45	34,74	24,55	31,84	28,96	40,93	108,91	190,79
	Yanal saçılım oranı	0,28	0,21	0,07	0,08	0,16	0,18	0,37	0,53	0,61	0,44
3 numaralı noktasal kaynak alanı	En uzak iki düşme hattı arasındaki mesafe (D) (m)	9,05	13,53	20,77	12,59	21,27	23,21	65,16	66,62	83,20	120,59
	Yuvarlanma mesafesi (L) (m)	21,49	25,98	36,07	28,99	35,19	30,94	64,06	72,90	96,00	191,88
	Yanal saçılım oranı	0,42	0,52	0,58	0,43	0,60	0,75	1,02	0,91	0,87	0,63
4 numaralı noktasal kaynak alanı	En uzak iki düşme hattı arasındaki mesafe (D) (m)	21,06	21,98	22,28	38,44	45,43	50,43	56,25	68,71	36,72	150,22
	Yuvarlanma mesafesi (L) (m)	20,63	23,49	24,15	32,04	35,04	56,02	59,79	110,54	113,01	169,61
	Yanal saçılım oranı	1,02	0,94	0,92	1,20	1,30	0,90	0,94	0,62	0,32	0,89
5 numaralı noktasal kaynak alanı	En uzak iki düşme hattı arasındaki mesafe (D) (m)	7,94	15,84	16,62	20,80	32,18	31,33	38,23	79,32	33,65	177,67
	Yuvarlanma mesafesi (L) (m)	23,33	29,84	29,16	35,48	43,97	47,26	54,15	105,18	86,48	211,99
	Yanal saçılım oranı	0,34	0,53	0,57	0,59	0,73	0,66	0,71	0,75	0,39	0,84

4. Sonuç ve Öneriler

Çalışma kapsamında, Tatların sayısal yüzey modeli üzerinde yapılan 3-boyutlu kaya düşme analizlerin de en önemli girdi parametrelerinden olan arazi geri verme (R_n ve R_t) katsayılarının, kaynak alandan koparak düşen kaya bloğunun parametreleri üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur. Normal geri verme (R_n) katsayılarının 0,1 ile 1,0 değerleri arasında yapılan analizlerde, 1 numaralı noktasal kaynak alanında maksimum yuvarlanma mesafeleri $R_n: 0,5$ değerinden itibaren artış gösterdiği ve R_n katsayısının 0,9 ile 1,0 seviyelerinde çok yüksek değerler aldığı belirlenmiştir. 2 ve 3 numaralı noktasal kaynak alanlarında $R_n: 0,8$ ve $R_n: 0,9$ seviyesinden itibaren maksimum yuvarlanma mesafelerinin çok yüksek değerler aldığı ve bu seviyelere kadar düşük durma mesafelerinin olduğu tespit edilmiştir. 4 ve 5 numaralı noktasal kaynak alanlarında maksimum yuvarlanma mesafeleri genellikle artış göstermiş ve diğer kaynak alanlara nazaran daha düzenli bir veri seti oluşturduğu gözlenmiştir. R_n katsayısının genellikle 0,8 değerinden itibaren maksimum yuvarlanma mesafeleri yüksek değerlere ulaşmış ve $R_n: 1,0$ seviyesinde analizler gerçeklikten uzaklaşmıştır.

R_n katsayısının artması ile 1 ve 4 numaralı kaynak alanlarında maksimum kinetik enerji miktarları belirli seviyelere kadar sabit kalmış ve bu seviyelerden sonra artışa geçtiği belirlenmiştir. Maksimum kinetik enerji miktarlarında en düzenli artış 5 numaralı noktasal kaynak alanında olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak R_n katsayısının artması ile maksimum yuvarlanma mesafelerinde artışların meydana geldiği fakat maksimum kinetik enerji miktarları ve maksimum sıçrama yüksekliklerinde düzenli bir veri setinin oluşmadığı belirlenmiştir. Böylelikle R_n katsayısının en çok maksimum yuvarlanma mesafeleri üzerinde etkili olduğu açıkça ortaya konulmuştur. Ayrıca R_n katsayısının 1,0 değerinde yapılan analizlerde, analizin gerçeklikten uzaklaştığı gözlenmiştir.

R_t katsayısının 0,1 ile 1,0 değerleri arasında yapılan analizlerde, genellikle R_t katsayısının artması ile bütün noktasal kaynak alanlarında maksimum yuvarlanma mesafesinin arttığı tespit edilmiştir. Yapılan analizlerin verileri incelendiğinde maksimum yuvarlanma mesafelerinde düzenli artışların olduğu bir veri seti oluşturduğu gözlenmiştir. R_t katsayısının 0,6 ile 0,7 seviyelerinden itibaren maksimum yuvarlanma mesafelerinde ciddi artışların olduğu ve özellikle R_t : 1,0 seviyesinde yüksek miktarlarda durma mesafelerinin olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla R_t : 1,0 değerinde yapılan analizlerde analizin gerçeklikten uzaklaştığı belirlenmiştir. R_t katsayısının değerinin artması ile bütün parametrelerde artışların olduğu fakat maksimum yuvarlanma mesafelerinde diğer parametrelere nazaran daha düzenli bir veri setinin olduğu belirlenmiştir.

R_t katsayısının değerinin artması ile maksimum kinetik enerji miktarları ve maksimum sıçrama yükseklikleri bazı seviyelere kadar sabit kalmış ve bu seviyelerden itibaren arttığı belirlenmiştir. R_t katsayıları ile yapılan analizlerde bütün noktasal kaynak alanlarında maksimum kinetik enerji miktarlarında değişimin olduğu ve R_n katsayısında bazı kaynak alanlarında olduğu gibi maksimum kinetik enerji miktarlarının bütün seviyelerde aynı kaldığı veri setlerinin bulunmadığı belirlenmiştir. Genel olarak tanjant geri verme katsayısı (R_t) bütün parametreleri etkilemekte ve maksimum yuvarlanma mesafelerini etkilediği ortaya konulmuştur. Ayrıca Normal (R_n) ve tanjant (R_t) geri verme katsayılarının artması ile en çok maksimum yuvarlanma mesafelerinde değişimler gözlenmiştir. Düşen kaya bloğunun durma noktasına kadar ulaştığı maksimum parametre miktarları incelendiğinde, R_t katsayısının R_n katsayısına oranla parametreler üzerinde daha etkili olduğu belirlenmiştir. R_n ve R_t katsayılarının 1,0 seviyelerinde, düşen kaya bloğu çarpma etkisi altında enerjisinden hiç kayıp vermeksizin hareketine devam ettiği için analizlerin bu seviyede gerçeklikten uzaklaştığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni ise kaynak zondan düşen bloğun topoğrafyaya çarptığında enerjisini hiç kaybetmiyormuş gibi davranmasıdır.

Yapılan analizlerde elde edilen sonuçlar incelendiğinde, düşen kaya bloğunun arazi geri verme (R_n ve R_t) katsayılarının belirli bir değere ulaştıktan sonra kinetik enerjilerinin artmakta olduğu tespit edilmiştir. Kinetik enerjisi artan kaya bloğunun sıçrama yüksekliğinin de benzer oranda arttığı tespit edilmiştir.

Dinçer vd. (2016) aynı saha üzerinde yaptıkları çalışmada, topoğrafik haritadan sayısal yükseklik modeli üreterek kaya düşme analizleri gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada İHA'dan elde edilen sayısal yükseklik modeline göre daha düşük çözünürlüğe sahip sayısal yükseklik modelinde yapılan analizlerde, parametreler daha yüksek değerler almıştır. Buna göre, kaya düşme sahalarında yapılacak kaya düşme analiz çalışmalarında sayısal yükseklik/yüzey modelinin çözünürlüğünün yüksek olması, sonuçların gerçekçiliğini de önemli oranda artırmaktadır.

Tatların yüzey modeli üzerinde yapılan kaya düşme analizlerinde, normal (R_n) ve tanjant (R_t) geri verme katsayılarının doğru seçiminin önemi ortaya konulmuştur. Kaya düşme riski bulunan sahalarda 3-boyutlu modeller üzerinde yapılan analizlerde arazi geri verme (R_n ve R_t) katsayılarının seçimi büyük önem arz etmektedir. R_n ve R_t katsayılarının farklı değerlerinde, kaynak zondan koparak harekete başlayan kaya bloğunun yuvarlanma hattındaki yön değiştirmeleri, maksimum enerji miktarı, sıçrama yüksekliği ve en önemlisi maksimum yuvarlanma mesafelerinde ciddi farklar oluştuğu belirlenmiştir. Özellikle maksimum yuvarlanma mesafelerinin artması ile düşen kaya bloğunun tehlike boyutu artmakta ve böylelikle yapılması planlanan iyileştirme ve önleme çalışmalarını etkilemektedir. Dolayısıyla kaya düşme riski bulunan sahalarda, kaya düşme mekanizmasının daha net anlaşılabilmesi ve yapılacak iyileştirme çalışmalarının en uygun şekilde yapılabilmesi için geri verme (R_n ve R_t) katsayılarının sahaya en uygun ve doğru değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, İbrahim UYKUN'un, Prof. Dr. Mutluhan AKIN ve Dr. Öğr. Üyesi Ogün Ozan VAROL'un danışmanlığında, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği bölümünde, "Kaya Düşme Analizlerinde Geri Verme Katsayısı Etkisinin 3-Boyutlu Modellerle Değerlendirilmesi" isimli Yüksek Lisans Tezinden üretilmiştir.

Kaynaklar

- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2022). *AFAD Türkiye'nin Afet Risk Haritasını Çıkarttı*. <https://www.afad.gov.tr/afad-turkiyenin-afet-risk-haritasini-cikardi-merkezicerik>
- Akın, M., Dinçer, İ., Orhan, A., Ok, A. Ö., Akin, M., & Topal, T. (2018). Kaya Tutma Hendek Performansının 3-Boyutlu Kaya Düşme Analizleriyle Değerlendirilmesi: Akköy (Ürgüp) Örneği. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 43(2), 211–232. <https://doi.org/10.24232/jmd.655005>
- Akın, M., Dinçer, İ., Ok, A. Ö., Orhan, A., Akin, M. K., & Topal, T. (2019). *Kapadokya (Nevşehir) Bölgesindeki Kaya Düşmelerinin Arazi Lazer Taraması (TLS) Yardımıyla 3-Boyutlu (3-D) Analizi ve Kaya Düşme Tehlike Haritalarının Oluşturulması* (Proje No: UDAP-G-16-03). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ulusal Deprem Araştırma Programı (UDAP).

- Akın, M., Dinçer, İ., & Orhan, A. (2022). Kaya Düşmelerinin 3-Boyutlu Analizi: Kapadokya Bölgesinden Bir Örnek. *Yer Mühendisliği* 17, 46–59.
- Alemdag, S., Bostancı, H. T., & Gacener, E. (2022a). GIS-based determination of potential instabilities and source rock areas on the Torul-Kürtün (Gümüşhane) motorway, rockfall, and protection structure analyses. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(1), Article 30. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02498-7>
- Alemdag, S., Kara, R. T., & Bostancı, H. T. (2022b). Evaluation of potential rock falls with three-dimensional analysis: Example of Oltanbey and Hasanbey districts (Gümüşhane city center). *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 169(169), 87–104. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.977928>
- Ashayer, P., (2007). *Application of Rigid Body Impact Mechanics and Discrete Element Modeling To Rockfall Simulation* [Doctoral theses, University of Toronto]. Doctoral and Master theses prior to ETD mandate (pre-2009). <http://hdl.handle.net/1807/112209>
- Atabey, E., Tarhan, N., Papak, İ., Akarsu, B., & Taşkıran, A. (1987). *Ortaköy, Tuzköy (Nevşehir) – Kesikköprü (Kırşehir) yöresinin jeolojisi* (MTA Rapor No: 8156). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.
- Atabey, E. (1989a). *MTA 1/100.000 ölçekli açınsama nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi, Aksaray H18 (K32) Paftası*. MTA Jeoloji Etütleri Dairesi.
- Atabey, E. (1989b). *MTA 1/100.000 ölçekli açınsama nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi, Aksaray H19 (K33) Paftası*. MTA Jeoloji Etütleri Dairesi.
- Azzoni, A., La Barbera, G., & Zaninetti, A. (1995). Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 32(7), 709–724. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(95\)00018-C](https://doi.org/10.1016/0148-9062(95)00018-C)
- Batman, B. (1978). Haymana kuzeyinin jeolojik evrimi ve yöredeki melanjin incelenmesi – I. Stratigrafi Birimleri. *Yerbilimleri*, 4(1-2), 95–124.
- Bounab, A., El Kharim, Y., & El Hamdouni, R. (2022). The Suitability of UAV-Derived DSMs and the Impact of DEM Resolutions on Rockfall Numerical Simulations: A Case Study of the Bouanane Active Scarp, Tétouan, Northern Morocco. *Remote Sensing*, 14(24), Article 6205. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.977928>
- Castelli, M., Torsello, G., & Vallero, G. (2021). Preliminary modeling of rockfall runout: Definition of the input parameters for the QGIS plugin QPROTO. *Geosciences*, 11(2), Article 88. <https://doi.org/10.3390/geosciences11020088>
- Christen, M., Bartelt, P., & Gruber, U. (2007). RAMMS – a modelling system for snow avalanches, debris flows and rockfalls based on IDL. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, 2007(4), 289–292.
- Crosta, G.B., & Agliardi, F., (2004). Parametric evaluation of 3D dispersion of rockfall trajectories. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(4), 583–598. <https://doi.org/10.5194/nhess-4-583-2004>
- Çapar, N. (2018). *Kaya Düşmesi Analizinde Geri Sıçrama Katsayısının Etkisinin Deneysel ve Analitik Yöntemlerle İncelenmesi* [Doktora tezi, Hacettepe Üniversitesi] YÖK Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Dinçer, İ., Orhan, A., Frattini, P., & Crosta, G. B. (2016). Rockfall at the heritage site of the Tatlarin Underground City (Cappadocia, Turkey). *Natural Hazards*, 82, 1075–1098. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2234-z>
- Dorren, L. K. A. Maier, B., Putters, U. S., & Seijmonsbergen, A. C. (2004). Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps. *Geomorphology*, 57(3-4), 151–167. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(03\)00100-4](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00100-4)
- Douglas, G. R. (1980). Magnitude frequency study of rockfall in Co. Antrim, North Ireland. *Earth Surface Processes and Landforms* 5(2), 123–29. <https://doi.org/10.1002/esp.3760050203>
- Evans, S. G., & Hungr, O. (1993). The assessment of rockfall hazard at the base of Talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal* 30(4), 620–636. <https://doi.org/10.1139/t93-054>
- Fanos, A., & Pradhan, B. (2018). Laser Scanning Systems and Techniques in Rockfall Source Identification and Risk Assessment: A Critical Review. *Earth Systems and Environment*, 2, 163–182. <https://doi.org/10.1007/s41748-018-0046-x>
- Gardner, J. S. (1983). Rockfall frequency and distribution in the Highwood Pass area, Canadian Rocky Mountains. *Zeitschrift Für Geomorphologie*, 27, 311–324.
- Gökçe, O., Özden, Ş., & Demir, A. (2008). *Türkiye’de afetlerin mekansal ve istatistiksel dağılımı afet bilgileri envanteri*. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü.
- Grove, J. M. (1972). The incidence of landslides, avalanches and floods in western Norway during the little ice age. *Arctic and Alpine Research*, 4, 131–38. <https://doi.org/10.1080/00040851.1972.12003633>
- Jaboyedoff, M., & Labiouse, V. (2011). Technical note: preliminary estimation of rockfall runout zones. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(3), 819–828. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-819-2011>
- Kalender, A. (2017). *Konik yayılım yaklaşımıyla kaya düşmesi potansiyelinin değerlendirilmesine yönelik bir yöntem önerisi* [Doktora tezi, Hacettepe Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Lambert, S., & Nicot, F. (2011). *Rockfall Engineering*. John Wiley & Sons.
- Lan, H., Martin, D., & Lim, C. (2007). RockFall analyst: A GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling. *Computers & Geosciences*, 33(2), 262–279. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.05.013>
- Luckman, B. H. (1976). Rockfalls and rockfall inventory data: some observations from surprise valley, jasper national park. *Earth Surface Processes*, 1(3), 287–298. <https://doi.org/10.1002/esp.3290010309>
- Okura, Y., Kitahara, H., Sammori, T., & Kawanami, A. (2000). The effects of rockfall volume on runout distance. *Engineering Geology*, 58(2), 109–124. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00049-1](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00049-1)
- Polat, A. (2020). CBS tabanlı 3b kaya düşmesi analizi ve veri hazırlama süreçleri: Kavak köyü (Sivas-Türkiye) örneği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(3), 1205–1222. <https://doi.org/10.17482/uumfd.769109>
- Quanterra. (2003). *Conefall (v.1.0)*. <https://quanterra.ch/portfolio-items/conefall/>
- Ritchie, A. M. (1963). Evaluation of rockfall and its control. *Highway Research Board*, 17,13–27.
- RocPro3D. (2014). *RocPro3D software*. http://www.rocpro3d.com/rocpro3d_en.php
- Seymen, İ. (1981). Karaman (Kırşehir) dolayında Kırşehir Masifinin stratigrafisi ve metamorfizması. *TJK Bülteni*, 24(2), 101–108.

- Schweigl, J., Ferretti, C., & Nössing, L. (2003). Geotechnical characterization and rockfall simulation of a slope: A practical case study from South Tyrol (Italy). *Engineering Geology*, 67, 281–296. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00186-2](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00186-2)
- Scioldo, G. (2006). *User guide ISOMAP & ROTOMAP – 3D surface modelling and rockfall analysis*. <http://www.geoandsoft.com/manuali/english/rotomap.pdf>
- Statham, I. (1979, March 29–30). *A simple dynamic model of rockfall: some theoretical principles and field experiments* [Conference presentation]. International Colloquium of Physical and Geomechanical Models, Bergamo, Italy.
- Stronge, W. J. (2000). *Impact Mechanics*. Cambridge University Press.
- Turner, A. K., & Schuster, R. L. (2012). *Rockfall: Characterization and Control*. Transportation Research Board.
- Utlü, M., Öztürk, M. Z., & Şimşek, M. (2020). Emli Vadisi’ndeki (Aladağlar) Talus Depolarının Kantitatif Analizlere Göre İncelenmesi. In S. Birinci, Ç. Kıvanç Kaymaz & Y. Kızılkın (Eds.), *Coğrafi Perspektifle Dağ ve Dağlık Alanlar (Sürdürülebilirlik-Yönetim-Örnek Alan İncelemeleri)* (ss.51–72). Kriter Yayınevi.
- Utlü, M., & Akgümüş, M. F. (2023). QGIS-Qproto yazılımı ile Konik Temelli 3 Boyutlu Kaya Düşme Modellemesi: Mazı Köyü Örneği-Nevşehir (Ürgüp). *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 9(2), 311–323. <https://doi.org/10.21324/dacd.1292541>
- Uykun, İ. (2024). *Kaya Düşme Analizlerinde Geri Verme Katsayısı Etkisinin 3-Boyutlu Modellerle Değerlendirilmesi* [Yüksek lisans tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Varnes, D. J. (1978). Slope Movement Types and Processes. In R. L. Schuster & R. J. Krizek (Eds.), *Landslides, Analysis and Control* (pp. 11–33). National Academy of Sciences.
- Varol, O. O., Akın, M., Orhan, A., & Dincer, İ. (2023). Kaya Düşmelerinin 3-Boyutlu Olasılıksal Analizlerle ve Ampirik Yöntemlerle Değerlendirilmesi: Kayseri – Soğanlı Yerleşim Yeri Örneği. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 47(1), 1–28. <https://doi.org/10.24232/jmd.1267107>
- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L. K. A., Gerber, W., & Jaboyedoff, M. (2011). Rockfall Characterization and Structural Protection-a Review. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(9), 2617–2651. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2617-2011>
- Wyllie, D. C. (2015). *Rock Fall Engineering*. CRC Press.