

Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi

Journal of Geomorphological Researches

© Jeomorfoloji Derneği

www.dergipark.gov.tr/jader

E - ISSN: 2667 - 4238



Araştırma Makalesi / Research Article

DEREBAŞI (KAÇKAR DAğI) KAYA BUZULUNUN JEOMORFOLOJİSİ VE KİNEMATİK ÖZELLİKLERİ

Geomorphology and Kinematic Characteristics of the Derebaşı Rock Glacier, Mt. Kaçkar

Serdar YEŞİLYURT

Ankara Üniversitesi, Dil ve Tarih-Coęrafya Fakóltesi, Coęrafya Bölümü, Ankara, TÜRKİYE
yesilyurt@ankara.edu.tr <https://orcid.org/0000-0002-2896-9644>

Makale Tariğesi

Geliş 4 şubat 2025

Kabul 14 şubat 2025

Article History

Received 4 February 2025

Accepted 14 February 2025

Anahtar Kelimeler

Buz Çekirdeği, Cephe Dikliği, Dağ
 Permafrostu, İHA Fotogrametrisi,
 Periglacial, Türkiye

Keywords

Ice Core, Front Slope, Mountain
 Permafrost, UAV Photogrammetry,
 Periglacial, Türkiye

Atıf Bilgisi / Citation Info

Yeşilyurt, S. (2025) Derebaşı (Kaçkar
 Dağı) Kaya Buzulunun Jeomorfolojisi
 ve Kinematik Özellikleri /
 Geomorphology and Kinematic
 Characteristics of the Derebaşı Rock
 Glacier, Mt. Kaçkar, Jeomorfolojik
 Araştırmalar Dergisi / Journal of
 Geomorphological Researches, 2025
 (14): 74-96.

doi: 10.46453/jader.1633480

ÖZET

Kaya buzulları, yüksek dağlık ortamlarda önemli periglasyal yer şekilleri olup, permafrost dağılımının ve iklim değişikliğinin etkilerinin belirlenmesinde kritik göstergelerden biridir. Bu çalışma, Türkiye'nin en geniş periglasyal alanlarından biri olan Kaçkar Dağı'ndaki Derebaşı Kaya Buzulu'nun jeomorfolojik özelliklerini ve kinematik davranışlarını incelemektedir. GNSS destekli İHA fotogrametrisi kullanılarak yüksek çözünürlüklü Sayısal Yüzey Modelleri (SYM) ve ortofotolar üretilmiş ve 2023-2024 yılları arasındaki yıllık hareket, yüzey deformasyonu ve aktivite durumu analiz edilmiştir. Bulgular, Derebaşı Kaya Buzulu'nun aktif, inaktif ve relik bölümler içeren karmaşık bir morfolojiye sahip olduğunu ve hem glasyal (buz çekirdekli) hem de periglasyal (permafrost) süreçler tarafından şekillendiğini göstermektedir. Kaya buzulunun 3. lobu (LB3), yıllık maksimum 60 cm yatay hareket hızıyla en aktif bölüm olarak belirlenirken, LB1'in cephe kısmı bitki örtüsü ve durağan topoğrafyası ile relik kaya buzulu karakteri sergilemektedir. LB1'in orta bölümü, derin sırt-oluk yapılarıyla permafrost hareketinin izlerini taşıırken, LB3'ün dişbükey gövde yapısı ve düzgün yüzeyi buz çekirdeğinin varlığına işaret etmektedir. Kinematik analizler, topoğrafik kısıtlamalar ve döküntü beslenmesi ile şekillenen heterojen hareket paternlerini ortaya koymuştur. LB1'de sıkıştırılmalı akışa bağlı deformasyon yapıları gözlenirken, LB3'te gerilmeli deformasyon desenleri belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca bölgedeki dağ permafrostunun güncel alt sınırının yaklaşık 2900 m olduğu hesaplanmıştır. Tespit edilen hareketler permafrost istikrarsızlığına işaret etse de, tek yıllık gözlem periyodu uzun vadeli eğilimler hakkında kesin sonuçlar çıkarmaya yetmemektedir. Bu araştırma, Derebaşı Kaya Buzulu'nun yüksek çözünürlüklü kinematik değerlendirmesini sağlayarak, jeomorfolojik evrimi ve iklim değişikliğine duyarlılığı konusunda önemli bilgiler sunmaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmaların uzun vadeli izleme programları, jeofizik araştırmalar ve sondaj incelemelerini içermesi, döküntü altı buz içeriğinin, permafrost kararlılığının ve kaya buzullarının iklim değişikliğine uzun vadeli tepkisinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.

ABSTRACT

Rock glaciers are significant periglacial landforms that play a crucial role in high mountain environments, acting as indicators of permafrost distribution and climate change impacts. This study investigates the geomorphological characteristics and kinematic behavior of the Derebaşı Rock Glacier (DRG), located in the Eastern Black Sea Mountains, one of the most extensive periglacial regions in Türkiye. Using GNSS-supported UAV photogrammetry, high-resolution Digital Surface Models (DSMs) and orthophotos were generated to analyze the annual movement, surface deformation, and activity status of the rock glacier between 2023 and 2024. The results reveal that the DRG exhibits a complex morphology consisting of active, inactive, and relict sections, shaped by both glacial (ice-core) and periglacial (permafrost) processes. The LB3 is identified as the most active part of the rock glacier, with a maximum annual horizontal movement of 60 cm, while LB1's front section is classified as relict, characterized by a subdued topography and vegetation cover. The LB1's mid-section exhibits deep parallel ridge-trough structures, indicative of permafrost creep, whereas LB3's convex shape and smooth surface suggest an ice-core presence. The kinematic analysis indicates heterogeneous movement patterns influenced by topographic constraints and debris supply, with compression-induced flow structures in LB1 and tensile deformation patterns in LB3. The study also estimates that the current lower boundary of mountain permafrost in the region is approximately 2900 m.

While the detected movements suggest possible permafrost instability, the single-year observation period limits conclusive assessments of long-term trends. This research provides the first high-resolution kinematic assessment of the Derebaşı Rock Glacier, offering essential insights into its geomorphological evolution and climate sensitivity in Türkiye. Future studies incorporating long-term monitoring programs, geophysical surveys, and borehole investigations will be essential to better understand the subsurface ice content, permafrost stability, and the long-term response of rock glaciers to climate change.

© 2025 Jeomorfoloji Derneği / Turkish Society for Geomorphology
Tüm hakları saklıdır / All rights reserved.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Rock glaciers are key indicators of periglacial environments, reflecting both past and present climatic conditions in high-mountain regions. Composed of ice core or ice-rich permafrost and debris, they creep downslope under gravitational forces, forming distinctive ridges and furrows that are highly sensitive to temperature and moisture variations (Wahrhaftig & Cox, 1959; Potter, 1972; Wayne, 1981; Haeberli, 1985; Barsch, 1996; Haeberli et al., 2006; Janke & Frauenfelder, 2008). Recent rock glacier movement rates observed in the Alps, Himalayas, and Andes, possibly linked to rising temperatures (Delaloye et al., 2013; Scapozza et al., 2014; Vivero et al., 2022), underscore the need for detailed investigations into their internal structure and displacement characteristics. Understanding these processes is essential for assessing permafrost stability, climate change impacts, and high-altitude hydrological contributions (Haeberli et al., 2006; Knight et al., 2019).

Although rock glaciers can evolve under different settings—ranging from purely periglacial conditions to glacially derived ice cores—they are typically linked to cold climates where permafrost is sustained (Barsch, 1978; Giardino & Vitek, 1988; Whalley & Martin, 1992; Knight et al., 2019). Two primary conceptual models have been proposed for rock glacier development. The first is a permafrost model, describing slow permafrost creep within ice-rich debris matrices (Wahrhaftig & Cox, 1959; Haeberli, 1985). The second is a glacial model, in which stagnant ice or ice patches become buried by debris, forming an ice core that creeps downslope (Potter, 1972; Humlum, 1982). It is, however, not uncommon for a single rock glacier to display mixed characteristics or to undergo multiple transitions over time

(White, 1976). Determining whether a rock glacier is dominated by permafrost creep, glacial ice, or a combination of both has broad implications for understanding paleoenvironmental conditions and for predicting future dynamics under changing climatic regimes.

In Türkiye, the Eastern Black Sea Mountains represent one of the most extensive periglacial regions of the country, containing numerous active and relict rock glaciers (Dede et al., 2015; Yeşilyurt et al., 2018; Yılmaz & Yeşilyurt, 2023; Dede, 2023). The DRG on Mt. Kaçkar is one of the largest examples in this region, exhibiting multiple lobes and distinct morphological features. Earlier work in the Mt. Kaçkar addressed the timing of glaciations through cosmogenic exposure dating of moraines (Akçar et al., 2007). However, detailed research on rock glacier kinematics in the region has been limited, with few high-resolution surface measurements capable of capturing annual motion or surface change.

This study aims to analyze the geomorphological and kinematic characteristics of the DRG to enhance our understanding of rock glacier dynamics in the Mt. Kaçkar. By utilizing GNSS-supported Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry, high-resolution Digital Surface Models (DSMs) and orthophotos were generated for the 2023–2024 period. These datasets facilitate the precise assessment of surface displacement and morphological features, allowing for an evaluation of how topographic and climatic factors influence rock glacier activity. Through the integration of kinematic analyses and geomorphological interpretations, this research seeks to determine the extent of permafrost-related movement, identify possible ice cores, and assess the implications of these results for long-

term permafrost stability and environmental changes in high mountains.

Material and Method

Fieldwork campaigns were carried out in August 2023 and 2024 to collect GNSS and UAV data. A permanent GNSS reference point was established on stable bedrock near the rock glacier front. This station was used to record 1-second interval RINEX data during UAV flights, thereby providing precise positional information via post-processing kinematic (PPK) corrections (Türk & Öcalan, 2020). The UAV surveys were performed with a DJI Mavic 3 Enterprise, operating flight lines with a forward overlap of at least 80% and a sidelap of 70%. Flight altitudes between 90 and 125 m above ground level were chosen to achieve ground sampling distances ranging from approximately 2.5 to 3.5 cm per pixel. To ensure consistent spatial resolution, flight paths were organized parallel to the main downslope direction of the rock glacier, compensating for the 400 m altitude difference between the rooting zone and the terminus. A total of around 1100 stereoscopic images were acquired each year. Using Agisoft Metashape®, dense point clouds were produced and used to generate high-resolution DSMs and orthophotos with sub-decimeter horizontal accuracy.

The mapped extent of the DRG was digitized within a Geographic Information Systems (GIS) environment. Ridge and furrow patterns, frontal slopes, and lateral margins were delineated on the basis of orthophotos, hillshade models, and Red Relief Image Maps (Chiba et al., 2008). Manual image correlation of repeated orthophotos from 2023 and 2024 was performed to define horizontal displacement vectors. Areas characterized by minimal or no visible movement (<3 cm/y) were excluded due to potential cumulative errors from GNSS and UAV imagery. Vertical changes were assessed by differencing the 2023 and 2024 DSMs, using a minimum vertical threshold of 5 cm to rule out noise from photogrammetric processing (Wheaton et al., 2010; Vivero & Lambiel, 2024). The accuracy of vertical change detection was also verified in areas of stable terrain bordering the rock glacier.

Results and Discussion

The Derebaşı Rock Glacier exhibits a complex, multi-lobed structure, extending 1388 m downslope with a total area of around 0.63 km². The main body (LB1) merges with a lateral lobe (LB2) on the west and a more independent, younger lobe (LB3) on the south-southwest, forming a composite feature shaped by both glacial (ice-core) and periglacial (permafrost) processes. Morphometric analysis reveals that LB1 includes a relict frontal section (Unit 1) characterized by subdued topography, vegetation cover, and an absence of detectable movement. This section is consistent with the hallmarks of fossil or relict rock glaciers, in which any remaining ice has long since melted, allowing for soil development and plant colonization (Haeberli, 1985; Baroni et al., 2004).

A middle section of LB1 (Unit 2) displays pronounced ridges and furrows typical of permafrost creep, yet annual kinematic measurements indicate very low activity, suggesting a transition toward inactivation. By contrast, the upper segment of LB1 (Unit 3) is clearly active, exhibiting both horizontal and vertical displacements. Here, the surface is nearly devoid of lichens or vascular plants, consistent with ongoing movement and regular overturning of debris. The photogrammetric measurements in this upper segment show a yearly horizontal displacement of up to 15–40 cm in parts of the flowline, driven by compressive flow near the boundary with the stable Unit 2. This compression is evidenced by strongly developed, parallel ridge-trough systems. LB3 stands out as the most active component, with a maximum annual horizontal displacement of 60 cm measured at its frontal slope. This lobe features a convex surface, hinting at a possible ice core. The vertical change analysis confirms a moderate surface uplift (in some areas approaching 20 cm over one year) near the center of LB3, while the front experiences a slight surface lowering (approximately 15 cm) attributed to tensile stress and potential thinning of internal ice. Similar processes have been documented in rapidly moving rock glaciers in the Swiss Alps (Delaloye et al., 2013) and highlight the

heterogeneous nature of periglacial creep (Haeberli et al., 2024).

Regarding the origin of the DRG, the overall morphology suggests interactions between ice core and permafrost creep (White, 1976; Whalley & Martin, 1992). LB1's frontal sections may represent older glacier remnants from late Pleistocene or early Holocene glaciations (Akçar et al., 2007), later reworked and partially reactivated by permafrost creep. The rooting zone of LB1 and the entirety of LB3 likely contain preserved ice cores. However, direct evidence such as thermokarst depressions or exposed ice patches was not identified in the study, unlike other sites in the eastern Black Sea region where dead-ice exposures have been observed (Kaldırım, 2023). Establishing definitive ice-core thickness or geometry would require geophysical surveys or borehole drilling. From a broader perspective, the estimated lower boundary of permafrost around 2900 m a.s.l. in the Mt. Kaçkar aligns with morphological indicators such as rock glacier distribution and the continued presence of small cirque glaciers above 3000 m. a.s.l. While the detected movements in LB3 and the upper portion of LB1 suggest ongoing permafrost creep, the single-year timescale does not permit definitive conclusions about longer-term trends.

Conclusion

The Derebaşı Rock Glacier represents a prominent example of a composite rock glacier system in the Mt. Kaçkar, offering valuable insights into both periglacial and glacial processes in one of Türkiye's most extensive periglacial areas. GNSS-supported UAV photogrammetry and high-resolution DSM differencing reveal that this rock glacier comprises active, inactive, and relict segments. The most notable movement occurs in LB3, with annual horizontal displacements up to 60 cm. LB1 shows spatially variable behaviors, ranging from relict front sections to moderately active zones near its rooting zone. These results support the interpretation that the DRG formed under mixed glacial and periglacial processes, with ongoing ice preservation in the upper lobes and extensive permafrost creep. The results also suggest that local topography,

sediment supply, and possible ice content all contribute to the heterogeneous motion patterns observed. Although short-term velocity measurements cannot fully capture longer-term behavior, they highlight the sensitivity of DRG to climatic and geomorphic drivers. Longer-term monitoring efforts and detailed climatological data are imperative for detecting temporal variations in velocity and correlating them with local or regional warming trends. Future investigations should incorporate repeat UAV surveys, geophysical survey, and borehole observations to quantify internal ice content and thermal regimes. Such efforts will be critical for understanding the DRG's long-term response to climate variability, its role in local water storage, and the stability of periglacial landforms across high-mountain environments in Türkiye and beyond. By establishing a baseline for current kinematics, this study offers a foundation for ongoing periglacial monitoring and provides a valuable case study for evaluating the implications of climate change in high-alpine regions.

1. GİRİŞ

Periglasyal yer şekilleri, genellikle buz içeren sediman ve kaya döküntülerinin karışımından oluşur (Haeberli vd., 2006; Buckel vd., 2022). Bu oluşumlar arasında en karakteristik olanlardan biri kaya buzullarıdır. Kaya buzulları, düşük sıcaklıklar ve bol kaya döküntüsü ile ilişkilendirilen yüksek dağlık alanlarda yaygın olarak görülmektedir (Wayne, 1981; Haeberli, 1985). Permafrostun hareketiyle şekillenen aktif jeomorfolojik yapılar olarak tanımlanan bu oluşumlar, büyük miktarda buz ve moloz taşıyarak yüksek dağ çevrelerinde dinamik süreçlere katkıda bulunur (Vivero & Lambiel, 2024). Kaya buzulları, buz çekirdeği, gözenek buzu ve buz merccekleri ile köşeli kaya döküntüsünün birleşiminden oluşur ve bu karışım, mevsimsel olarak donup çözölebilen kaba bir döküntü tabakasıyla kaplıdır (Wahrhaftig & Cox, 1959; Potter, 1972; Haeberli, 1985; Barsch, 1996). Kaya ve buz karışımı içeriğiyle kaya buzulları yer çekimi etkisiyle yavaşça aşağı doğru hareket eder. Bu hareket sonucu, yüzeylerinde enine veya boyuna uzanan sırtlar ve oluklar oluşur ve genellikle plan görünimleri dil şeklinde ya da lobludur (Wayne, 1981; Haeberli, 1985; Haeberli vd., 2006; Janke & Frauenfelder, 2008). Buz içeriği ve hareket durumuna göre kaya buzulları, aktif, inaktif (hareketsiz) ve fosil olmak üzere sınıflandırılmaktadır (Barsch & King, 1975; Haeberli vd. 1979; Barsch, 1996). Kaya buzulları, glasyal, periglasyal ve paraglasyal ortamlar gibi farklı süreçlere dayanarak oluşabilse de (Giardino & Vitek, 1988; Knight vd., 2019), genellikle dağ permafrostunun bir göstergesi olarak kabul edilir ve permafrostun alt sınırını belirlemede önemli bir kriter olarak kullanılır (Barsch, 1978; Barsch, 1996). Üzerlerini kaplayan döküntü tabakası (aktif katman), buz içeriğini koruyan bir yalıtıcı katman görevi görür ve bu sayede kaya buzulları, çıplak buzullara kıyasla iklim değişikliğine karşı daha dirençli hale gelir. Bu özellikleri nedeniyle, özellikle kurak bölgelerde, kaya buzulları önemli bir tatlı su kaynağı potansiyeline sahiptir (Jones vd., 2018).

Kaya buzulları, yıllık birkaç santimetre ile metre arasında değişen hızlarda hareket edebilir ve bu

hareket zaman içinde belirgin yüzey değişikliklerine yol açabilmektedir (Giardino vd., 2011; Kääb, 2013). Kinematik davranışları, çevresel koşullardaki değişikliklere duyarlıdır ve özellikle yerel topografya, buz içeriği, sıcaklık koşulları, yağış koşulları ve beslenme koşullarındaki değişikliklere bağlı olarak farklı hızlarda ilerleyebilir (Haeberli vd., 2024). Özellikle sıcaklık artışı gibi termal değişimler, yüzey hızlarında mevsimsel veya yıllık varyasyonlara neden olabilmektedir (Vivero, 2024). Son yıllarda, Alpler, Himalayalar ve And Dağları'ndaki kaya buzullarında gözlemlenen hızlanmalar, bu yapıların sıcaklık artışlarıyla ilişkili olarak iklim değişikliğine duyarlılığını göstermektedir (Delaloye vd., 2013; Scapozza vd., 2014). Bu nedenle, kaya buzullarının uzun vadeli izlenmesi hem jeomorfolojik ve iklimsel araştırmalar hem de su kaynakları yönetimi açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, Türkiye'nin en geniş periglasyal alanlarından biri olan Doğu Karadeniz Dağları'ndaki Derebaşı Kaya Buzulu (KB) ele alınmıştır. Aktif, inaktif ve fosil bölümlerden oluşan karmaşık bir sistem niteliğindeki Derebaşı KB'nin çevresindeki morenlerin tarihlendirilmesi (Akçar vd., 2007), bu oluşumun zamanının anlaşılmasını kolaylaştırmaktadır. Çalışmada GNSS destekli insansız hava aracı (İHA) temelli sayısal fotogrametri yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle kaya buzulunun 2023-2024 yılları arasındaki 1 yıllık hareket hızı ve yüzey deformasyonları belirlenmiş; jeomorfolojik ve morfometrik özellikleri ile aktivite durumu analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, Derebaşı KB'nin oluşum sürecinden günümüze kadar geçirdiği evrim değerlendirilmiş ve permafrost bozulması ile dağ ekosistemi stabilitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu analizler, kaya buzulunun kısa dönemli dinamik evrimini ve kinematik özelliklerini daha iyi anlamaya katkı sağlarken, aynı zamanda Kaçkar Dağı'ndaki çevresel değişimlerin daha kapsamlı şekilde değerlendirilmesine de olanak tanımaktadır.

1.1. Çalışma Alanının Genel Özellikleri

Doğu Karadeniz Dağları, Türkiye'nin en geniş buzullaşma sahasıdır (Yeşilyurt vd., 2018; Yılmaz & Yeşilyurt, 2023). Kuvaterner'in soğuk dönemlerinde onlarca vadi buzulunun bin

km²'den daha geniş bir alana yayıldığı Doğu Karadeniz Dağları'nda bugün birkaç küçük sirk buzulu 3932 m yüksekliğe ulaşan Kaçkar Dağı'nda bulunmaktadır (Şekil 1). Öte yandan Doğu Karadeniz Dağları, mevcutta Türkiye'nin en geniş periglasyal sahalarının başında gelmektedir. Paleobuzul alanıyla kabaca örtüşen bu zonda yaklaşık 200'ü aktif olan 1000'den fazla kaya buzulu bulunur (Şekil 1b). Bu çalışmaya konu olan Derebaşı KB, Kaçkar Dağı'nda yer almaktadır (Şekil 1c). Kaçkar Dağı'nın kuzeyinde Kavron buzul vadisi, doğu ve güneydoğusunda Barhal vadisinin kolları olan Hastaf ve Dübe buzul vadileri, güneyinde Davalı buzul vadileri bulunur. Kavron, Dübe ve Hastaf vadilerinde glasyal ve periglasyal konulu çalışmalara ek olarak kozmojenik tarihleme yöntemi uygulanarak buzullaşma tarihçesinin kurulduğu çalışmalar da yapılmıştır (Ör: Erinc, 1949; Löffler, 1970; Doğu vd., 1993; Akçar & Schlüchter, 2005; Akçar vd., 2007; Reber vd., 2022).

Doğu Karadeniz Dağları Karadeniz kıyısı gerisinde hızla yükselerek 40 km mesafede Kaçkar zirvesiyle 3900 metrenin üzerine çıktıktan sonra ana zirve eksenine paralel olarak güneybatı-kuzeydoğu doğrultusunda uzanan Çoruh vadisine iner. Dolayısıyla yüksek bir yamaç gradyanına sahiptir. Kuvaterner'in soğuk dönemlerinde oluşan buzullar ana sırt hattının kuzeyinde ve güneyinde 20 km'yi bulan uzunluğa ulaşmışlardır. Bugün bu buzulların kazdığı vadilerin sirkler bölgesinde soğuk dağ ortamıyla ilişkili olan kaya buzulları başta olmak üzere periglasyal yerşekilleri göze çarpar.

Doğu Karadeniz Dağları'nın temelini Kaçkar granitoyidi oluşturduğu için genellikle 3000 m altı yükseltilerde granitler görülürken, zirveler bölgesi volkanik litolojiye sahiptir (Güven, 1998). Bu nedenle Derebaşı KB'nin dil bölümü granitik litolojiye sahipken, kök bölümü volkanik kayalardan oluşmaktadır. Doğu Karadeniz Dağları'nın orografik özelliklerine bağlı olarak denize bakan kuzey yüzü yüksek yağışlara sahip olup, Çoruh vadisi yamaçları olan güneye bakan yüzü daha kuraktır. Meteorolojik veriler daha çok buzullaşma sınırı dışındaki meteoroloji istasyonlarından sağlandığı için, bugün kaya buzullarının olduğu yüksek sirkler bölgesini karakterize eden bir yağış verisi bulunmamaktadır.

2. YÖNTEM

Veri toplama ve araştırma yöntemleri, çalışmanın ana aşamalarını temsil eden üç alt bölüme ayrılmıştır. Bunlar GNSS ölçümleri, İHA (insansız hava aracı) ölçümleri, yüzey kinematiki ve yüksek çözünürlüklü jeomorfolojik haritalama çalışmalarıdır.

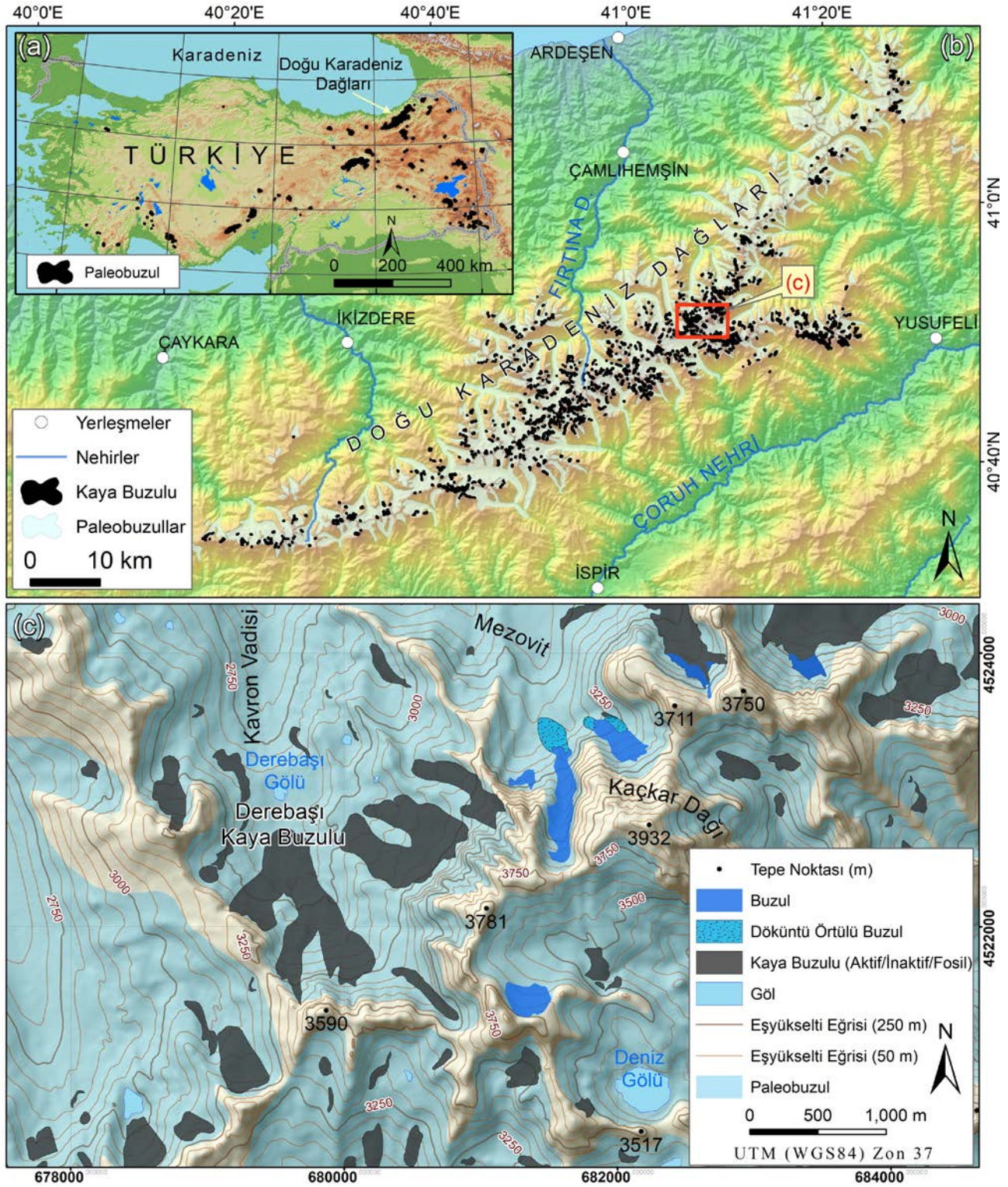
2.1. Jeodezik Ölçümler, İHA Uçuş Planlaması ve Sayısal Fotogrametri

2023 yılının Ağustos ayında gerçekleştirilen arazi çalışmalarında, Derebaşı KB'nin önündeki anakaya eşiği üzerinde bir GNSS ölçüm noktası belirlenmiştir. Sabit anakaya yüzeyinde "+" şeklinde çentik açılarak bu noktaya tripod destekli jalon üzerinde E-Survey'in E600 model GNSS alıcısı yerleştirilmiş ve TUSAGA-Aktif kullanılarak koordinatları belirlenmiştir. Bu GNSS noktası, sonraki yıllarda tekrarlanacak arazi çalışmalarında sabit referans noktası olarak kaydedilmiştir. 26 Ağustos 2023 ve 20 Ağustos 2024 tarihlerinde gerçekleştirilen İHA uçuşları sırasında, bu noktada 1 saniyelik RINEX formatında GNSS verileri toplanarak, İHA ile elde edilen görüntülerin konumsal doğruluğunu artırmak için kullanılmıştır.

Stereoskopik hava fotoğrafı çekimlerinde, DJI Mavic 3 Enterprise modeli İHA kullanılmış ve uçuş planlaması DJI Pilot 2 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Yüksek doğruluk ve detaylı görüntüler elde edebilmek için, doğrusal bindirme oranı % 80'in üzerinde, yanal bindirme oranı % 70 olarak belirlenmiştir. İHA'nın uçuş yüksekliği, 2.5-3.5 cm/piksel yersel çözünürlüğe sahip görüntüler elde edebilmek için yerden 90-125 metre aralığında olacak şekilde optimize edilmiştir. Kaya buzulunun kök bölümü ile dil bölümü arasındaki yükseklik farkı 400 m'ye ulaşmaktadır. Bu nedenle harita ölçeğinin sabit tutulması için uçuş hatları kaya buzulunun akış yönüne paralel olarak planlanmış ve yüzeye göre sabit irtifada uçuş gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle, kaya buzulunun tamamında eşit çözünürlük ve ölçekte görüntüler elde edilmiştir. 2023 ve 2024 yıllarında yapılan arazi çalışmalarında sis oluşumunun kaya buzulu üzerindeki görüntü kalitesini etkilememesi için uçuşlar sabah saat 09:00 ile 12:00 arasında tamamlanmıştır. Sabah saatlerinde yapılan İHA uçuşları nedeniyle kaya buzulu üzerindeki

bloklar ve engebeli yüzeylerin gölgeleri görece belirgin olmuştur. Kontrastın yükselerek ortofotolarda yerşeklinin daha net

görüntülenmesini sağlayan bu durum, otomatik yer değiştirme ölçümlerini olumsuz etkilemektedir.



şekil 1: Çalışma alanının lokasyon haritası. (a) Türkiye'deki paleobuzullaşma alanları ve Doğu Karadeniz Dağları'nın yeri. (b) Doğu Karadeniz Dağları'ndaki paleobuzullar ve kaya buzullarının dağılışı. Paleobuzul sahaları güncel periglasyal sahalarla büyük oranda örtüşmektedir. (c) Kaçkar Dağı'nın genelleştirilmiş glasyal ve periglasyal jeomorfoloji haritası / **Figure 1:** Location map of the study area. (a) Paleoglaciatioon areas in Türkiye and the position of the Eastern Black Sea Mountains. (b) Distribution of paleoglaciers and rock glaciers in the Eastern Black Sea Mountains. Paleoglacial areas largely overlap with present-day periglacial zones. (c) Generalized map of glacial and periglacial landforms in the Mt. Kaçkar.

Arazi alışmaları sırasında, ortalama 1100 adet stereoskopik hava fotoğrafı elde edilerek sayısal fotogrametri ile analiz edilmiştir. İHA ile çekilen fotoğrafların konumsal doğruluğu, İHA'nın kinematik GNSS verileri ile kaya buzulu önünde konumlandırılan sabit referans alıcısının statik GNSS verilerinin REDtoolbox yazılımı kullanılarak PPK (Post-Processing Kinematic / Ölçüm Sonrası Kinematik) yöntemiyle işlenmesi ile artırılmıştır. Bu süreçte, İHA tarafından çekilen görüntülerin koordinatları, sabit GNSS alıcısı referans alınarak rölatif konumlama prensibine göre düzeltilmiş ve yüksek hassasiyetli konum verileri elde edilmiştir (Türk & Öcalan, 2020). Güncellenen koordinatlar, REDtoolbox yazılımı tarafından doğrudan İHA fotoğraflarının meta verilerine kaydedilmiştir.

Fotogrametrik analizlerde, İHA görüntülerinin yanı sıra, Harita Genel Müdürlüğü'nden (HGM) temin edilen 15 cm/piksel yersel çözünürlüğe sahip 4 bantlı (RGB + NIR) stereoskopik hava fotoğrafları da kullanılmıştır. HGM hava fotoğraflarına ait dış yöneltme parametreleri (kameranın yalpalama açıları, odak uzaklığı ve sensör boyutu gibi) fotogrametri aşamasında kullanılmıştır (Uysal vd., 2015; Hendrickx vd., 2019). Stereoskopik İHA görüntüleri ile HGM görüntüleri yer kontrol noktası kullanılmadan Agisoft Metashape® yazılımı ile işlenerek ilk aşamada fotogrametrik dengeleme gerçekleştirilmiştir (Westoby vd., 2012; Hendrickx vd., 2019). Daha sonra yoğun nokta bulutu oluşturulmuş ve İHA için 2-3 cm/piksel, HGM için 15 cm/piksel mekânsal çözünürlüğe sahip sayısal yüzey modeli (SYM) ve ortofotolar üretilmiştir. Üretilen bu harita ürünleri, kaya buzulu alanlarının detaylı haritalanması ve uzun vadeli değişim analizleri için temel veri seti olarak kullanılmıştır.

2.2. Yüzey Kinematiği Ölçümleri

Derebaşı KB'daki hareket ve deformasyonların zamansal değişiminin belirlenmesi, akış yönü ve hareket dinamiklerinin anlaşılması için fotogrametrik ürünler kullanılarak hız vektör analizi yapılmıştır. Bunun için 2023-2024 yıllarına ait İHA temelli ortofoto ve SYM'ler kullanılmıştır. Yerşeklinin yüzey kinematiklerinin belirlenmesinde farklı zamanlara ait ortomozaiklerdeki belirgin noktaların manuel olarak karşılaştırılması kullanılan yöntemlerden birisidir (Messerli ve

Zurbuchen, 1968). Farklı zaman serilerine ait ortofotoların otomatik olarak karşılaştırılmasını ve yatay hareket hızlarının belirlenmesini sağlayan yazılımlar da yaygın olarak kullanılmaktadır (Heid & Käab 2012; Vivero vd., 2022). Ancak bu çalışmada bir yıllık arayla oluşturulan ardışık ortomozaik görüntüler üzerinde ortak referans noktaları belirlenmiştir. Daha sonra 2023 tarihli ortomozaik görüntüdeki referans noktası başlangıç noktası olarak alınmış, 2024 tarihli ortofoto ise bitiş noktası olarak seçilmiştir. Ardışık görüntülerdeki aynı noktalardaki yatay kaymalar için başlangıç ve bitiş noktaları arasında vektör biçimli bir doğru çizilmiştir. Bu doğrular hem bir yıldaki yatay yer değiştirmenin ölçölmesini sağlamış hem de hareket yönünün hesaplanmasını sağlamıştır. 3 cm altındaki hareket hızları GNSS ve İHA tabanlı hata payları nedeniyle analiz dışı bırakılmıştır. Derebaşı KB'da yatay hareket hızlarının tespiti için 201 ölçüm gerçekleştirilmiştir.

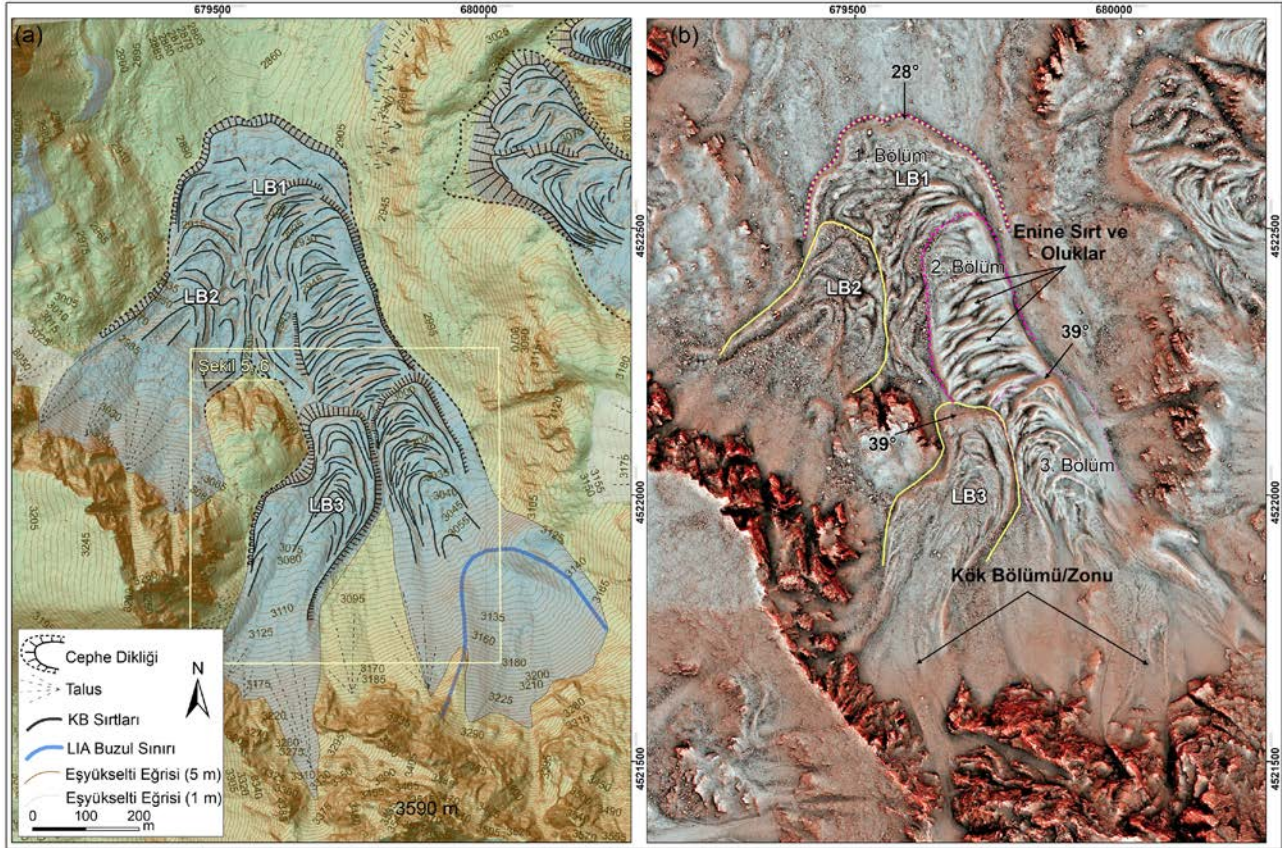
Kaya buzulu gibi hareketli jeomorfolojik oluşumlarda yatay yer değiştirme hızlarına ek olarak dikey deformasyonlar da izlenmektedir (Lane vd., 2003). Derebaşı KB'da iki farklı yıla ait SYM'ler karşılaştırılarak dikey hareket yönleri de saptanmıştır. Bunun için GCD (Geomorphological Change Detection) yazılımı kullanılmış (Wheaton vd., 2010) ve SYM'ler karşılaştırılarak yükselen ve alçalan yüzeyler saptanmıştır (Vivero & Lambiel; 2024). SYM'ler karşılaştırılırken minimum eşik değeri 5 cm olarak kabul edilmiş ve bu değerin altındaki değişimler gözardı edilmiştir.

2.3. Jeomorfolojik Haritalama

Çalışmada kullanılan yer isimleri, 1/25.000 ölçekli topoğrafya haritalarından alınmıştır. Fotogrametrik yöntemlerle elde edilen yüksek özünürlüklü SYM ve ortofotolar, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında sayısallaştırma sürecinde temel veri seti olarak kullanılmıştır. CBS yazılımları yardımıyla, öncelikle Kaçkar Dağı'ndaki buzullar ve kaya buzullarının sınırları sayısallaştırılmıştır. Ardından, kaya buzullarına ait sırtlar, oluklar ve cephe diklikleri haritalanmıştır. Sayısallaştırma işlemiyle vektör formatına dönüştürölen bu jeomorfolojik birimler, arazi çalışmaları sırasında toplanan verilerle birlikte yorumlanarak jeomorfoloji haritaları tamamlanmıştır (şekil 2). Haritaların temel katmanı olarak SYM'ler kullanılmıştır.

Glasyal ve periglasyal süreçlerin jeomorfolojik özelliklerinin daha iyi anlaşılması amacıyla, SYM'lerin hillshade görsellerine ek olarak Red Relief Image Map (RRIM / kırmızı rölyef haritası) görüntüleri hazırlanmıştır (Chiba vd., 2008; Chu vd., 2019; Kaneda & Chiba, 2019). RRIM haritası, QGIS 3.36 yazılımında SAGA eklentisi kullanılarak oluşturulmuş ve yüzey şekillerinin detaylarını daha iyi analiz etmek için detay

jeomorfoloji haritalarıyla birlikte değerlendirilmiştir (Şekil 2b). RRIM görselleri, morfolojik detayların daha kolay kaya buzulu sınırları, morfolojik ve kinematik kriterler temel alınarak belirlenmiş ve en son veri seti kullanılarak sayısallaştırılmıştır. Çalışmada gerçekleştirilen morfometrik analizler, SYM'ler temel alınarak Global Mapper® yazılımı ile yapılmıştır.



Şekil 2: Derebaşı KB'nin jeomorfoloji haritası ve kırmızı rölyef haritası. Jeomorfoloji haritasında belirgin olarak gösterilen cephe diklikleri ve yüzey sırt-oluk yapıları kırmızı rölyef haritasında bariz bir şekilde izlenebilmektedir.

Figure 2: Geomorphological map and red relief image map of the Derebaşı Rock Glacier. The frontal slopes and surface ridge-trough structures highlighted in the geomorphology map are distinctly visible in the red relief image map.

3. BULGULAR

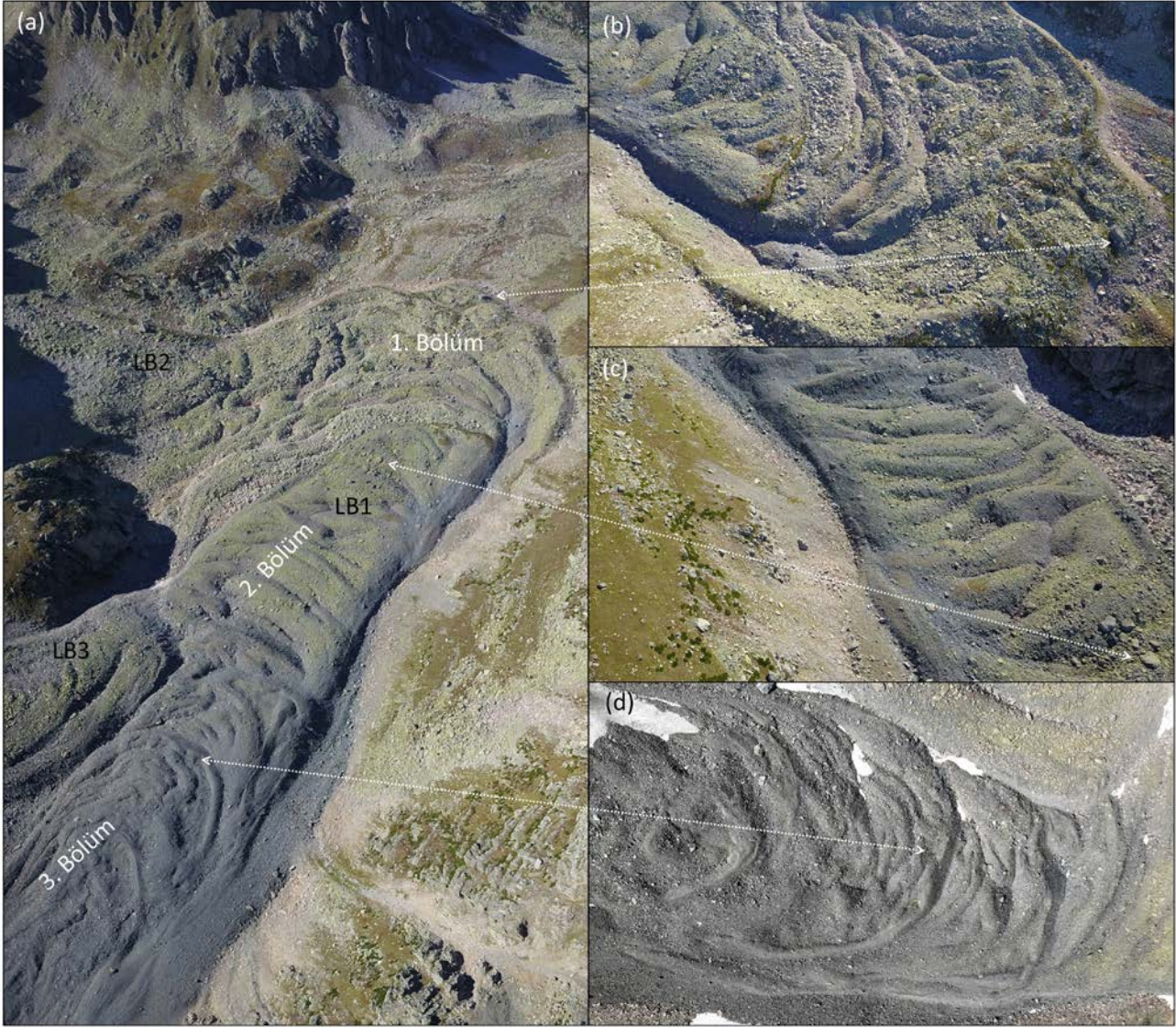
3.1. Jeomorfolojik ve Morfometrik Özellikler

Derebaşı KB, Kavron Buzul Vadisi'nin ana sirkli içinde gelişmiş olan Doğu Karadeniz Dağları'ndaki en büyük kaya buzullarından birisidir. Genel olarak dil-şekilli (uzunluğu genişliğinden fazla) kaya buzulu sınıfına girmekle birlikte, genişleyen cephe bölgesi nedeniyle piedmont veya spatula-şekilli bir form olarak da değerlendirilebilir (Şekil 2). Derebaşı KB'nin uzunluğu 1388 m alanı 628000 m² dir. Kaya buzulunun ana gövdesinin genişliği

cephe bölümünde 350 m, orta bölümde en dar yerde ise 200 m'ye kadar düşer. Derebaşı KB üç lobun – LB1, LB2 ve LB3 – birleşmesi sonucu meydana gelmiştir. Ana gövde lobu LB1'dir, cephe bölümüne güneybatı yönlü bağlanan LB2 ise LB1 ile iç içe girmiş durumdadır. LB1'in kök bölümünde güneybatıdan ulaşan ancak ayrı duran LB3 bulunur. Kaya buzulunun kaynak bölümleri granit ve volkanik litoloji sınırına denk geldiği için, kaya buzulunun cephesi, LB2'nin tamamı ve LB3'ün bir bölümü granit, ana gövdenin orta ve kök bölümü volkanik kayalardan oluşmaktadır. Bu nedenle kaya buzulu belirgin bir kontrast oluşturmaktadır.

Kaya buzulunun yüzeyinde kum-çakıl boyutundan 14 m çapında bloklara kadar değişen büyüklükte kaya döküntüsü bulunmaktadır. Kaya buzulunun döküntü katmanını oluşturan köşeli kaya blokları, granit

litolojide volkanik litolojiye göre daha kaba görünümündedir. Kaya buzulunun cephesinde 200 m³ hacminde ve 500 tonu aşan ağırlıkta bloklar bulunmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3: Derebaşı KB'nin farklı açı ve yönlerden İHA görüntüleri. (a) Kuzeybatıya doğru bakış, LB3'ün LB1'i ötelemesi ve LB3'ün yüzeyinde yoğun likenler görülmektedir; (b) kaya buzulunun relict cephe bölümü (LB1, 1. Bölüm); (c) LB1'in 2. Bölümünde yoğun liken örtüsü nedeniyle sarı ve yeşil tonlar hakim; (d) LB1'in 3. Bölümü likenlerden yoksun olduğu için koyu renkli volkanik litoloji görülmektedir.

Figure 3: UAV images of the Derebaşı Rock Glacier from different angles and directions. (a) View towards the northwest, showing LB3 displacing LB1 and dense lichen coverage on LB3's surface; (b) Relict frontal section of the rock glacier (LB1, Unit 1); (c) LB1's Unit 2, where yellow and green tones dominate due to extensive lichen cover; (d) LB1's Unit 3, which appears darker due to the absence of lichens and the presence of volcanic lithology.

Ana gövdeyi oluşturan LB1, 3590 m yükseklikteki zirvenin kuzeyinde başlayıp kuzey-kuzeybatı yönünde (N341°) yaklaşık 1388 m uzanırken, bu mesafe içerisinde 400 m'lik bir yükseklik kaybı yaşar. Toplam alanı 352600 m² olan LB1, cephe dikliği hariç gövde eğimi boyunca 22°; alansal olarak ise 27°'lik bir eğime sahiptir. Yapısal olarak, aktif döküntü

katmanının günlenme koşulları, bitki ve liken örtüsü yoğunluğu ile eğim farklılıkları göz önüne alınarak üç üniteye ayrılmıştır (Şekil 3 ve 4). Bunlar dil bölümünde orman güllerinin bulunduğu relict bölüm (1. Bölüm), yoğun likenli orta bölüm (2. Bölüm) ve likensiz kök bölümü (3. Bölüm). 1. Bölüm Derebaşı Gölü'nün güneyinde daha sönük ve basık topoğrafyasıyla

dikkat çeken relikt bölümdür. Relikt bölümde yoğun bitki örtüsü, orman glleri ve yüzeyde ince unsurlu sedimanlar ile toprak oluşunu gözlemlenmektedir (şekil 3b, 4d). 1. Bölümün cephe kalınlığı 11 m, cephe dikliği eğimi ise 28°'dir. LB1'in 2. Bölümü cephe kısmı hariç volkanik litolojiden oluşmaktadır. Cephe dikliği kalınlığı 12 m, eğimi ise 37°'dir. Bu bölümün gövdesi derin paralel oluk-sırt yapısına sahiptir (şekil 3c). Kaya döküntüsü yoğun likenlerle kaplıdır. Bu bölümün gerisinde ise 3. Bölüm uzanmaktadır. 3. Bölümün cephe dikliği daha belirgin olup, 13 m kalınlıkta ve 39° eğime sahiptir (şekil 4b). Yüzeyinde bitki ve liken örtüsü bulunmamaktadır. Bu bölümün de yüzey morfolojisi oldukça belirgin paralel sırt ve oluk yapılarından oluşmaktadır (şekil 3d). Ancak buradaki sırt ile oluklar daha yoğun ve sığ yapıdadır. 3. Bölümün kök kısmı taluslarla sirk duvarına bağlanmaktadır (şekil 4a ve 4c). LB1'in kök bölümünde sığ bir depresyon bulunmaktadır. 1. Bölümde litoloji ağırlıklı olarak granitten oluşurken; 2. ve 3. bölümlerde volkanik kaya döküntüsü hakimdir (şekil 4d ve 4e).

LB2 (yan cephe lobu), ana gövdeye batı yamacından yaklaşarak bağlanır ve cephedeki granit kaya döküntüsünün taşınmasında etkilidir. LB1 ile LB2'nin birleştiği bölgede, farklı hareket yönlerinin (KB ve KD) etkisiyle loblar belirli bir açıyla çarpışır; bu durum, düzensiz konsantrik sırt ve olukların oluşmasına neden olur (şekil 3a ve 4c). İlk birleşme alanından itibaren LB1 ile LB2 arasındaki sınırı oluşturan oluk takip edilerek iki lob arasındaki sınır ve stratigrafik ilişki belirlenebilmektedir. LB2'nin cephe dikliği 8 m kalınlığında olup, eğimi 40° olarak ölçülmüştür. Kaynağını granit anakayadan oluşan sirk yamacından alan bu lob, tamamen granit litolojiden oluşmakta ve yüzey topoğrafyası, cephede düzensiz sırt ve oluklarla, kök bölümünde ise daha engebesiz bir görünüm sunmaktadır.

LB1'nin 3. Bölümüne paralel uzanan 600 m uzunluğundaki LB3 (bağımsız kök lobu) ise dil şeklinde bağımsız bir lob olup, belirgin dışa bombeli (konveks) bir topoğrafyaya ve açık renkli sedimanlardan oluşan belirgin bir cephe dikliğine sahiptir (şekil 3a). 16 m kalınlıktaki bu cephe dikliğinin eğimi ise 39°, genişliği 125 metredir. Kenar dikliklerinin eğimleri ise daha

düşüktür. Bu lob 3300 metrelerden kaynaklanan bir çığ oluğu ve devamındaki talusla başlamakta ve 2967 m'de son bulmaktadır. Alanı 129500 m² olan LB3'n çizgisel yüzey eğimi 23°, alansal olarak ise 29°'dir. LB3'n cephe bölümüne doğru yüzeyinde bazı enine sırt ve oluklar olmakla birlikte oldukça silik bir görünüme sahipler. Bu nedenle bu lobun yüzeyi çok az engebeli olup daha düz bir topoğrafya sunmaktadır. LB3 başlangıçta sirk tabanına ve LB1'e doğru kuzeydoğu yönlü uzanırken, LB1 gövdesine ulaşmasıyla birlikte kuzeybatıya doğru bir dönüş yapmaktadır. Dolayısıyla LB1'in gövdesini aşamadığı için paralel olarak aynı doğrultuda uzanmaktadır. Ancak LB3'nin LB1'i kuzeydoğuya doğru sıkıştırdığı için LB1'in gövdesi burda kuzeye doğru sıkışarak ötelenmektedir. Dolayısıyla LB1'in daralmasına neden olmuştur (şekil 2 ve 3a).

3.2. Kaya Buzulu'nun Kinematik zellikleri

Derebaşı KB'da 2023-2024 aralığında bir yıllık hem yatay hem düşey yer değiştirme hızları hesaplanmış olup, LB1, LB2 ve LB3'n hareket hızları arasında önemli farklılıklar tespit edilmiştir. LB1'in 1. Bölümünde hareket saptanamamıştır. 2. Bölümde ise hareket hızı gövde kenarlarında çok düşük hızlarda olduğu için 1 yıllık zaman içinde anlamlı bir değişim saptanamamıştır. LB1'de yatay hareket ağırlıklı olarak 3. Bölümde belirginleşmektedir. Hareket hızları dil kısmında yıllık en fazla 15 cm'dir. Gövde üzerinde bu hareket hızı simetrik olmayıp gövdenin doğu sınırında daha belirgindir. Kök depresyonuna doğru hareket hızları 20 cm/yıl'ın üzerine çıkmakta sirk duvarına yaklaştıkça 40 cm/yıl'ı bulmaktadır. LB1'in 3. Bölümü olan bu aktif bölümde hareket yönleri kök depresyonu ile gövdenin ortasında kaya buzulunun merkezine doğru eğim aşağı olup, cepheye yaklaştıkça kuzeydoğuya (sağa) ve kuzeybatıya doğru (sola) doğru iki yönlü olarak sapmaktadır (şekil 5).

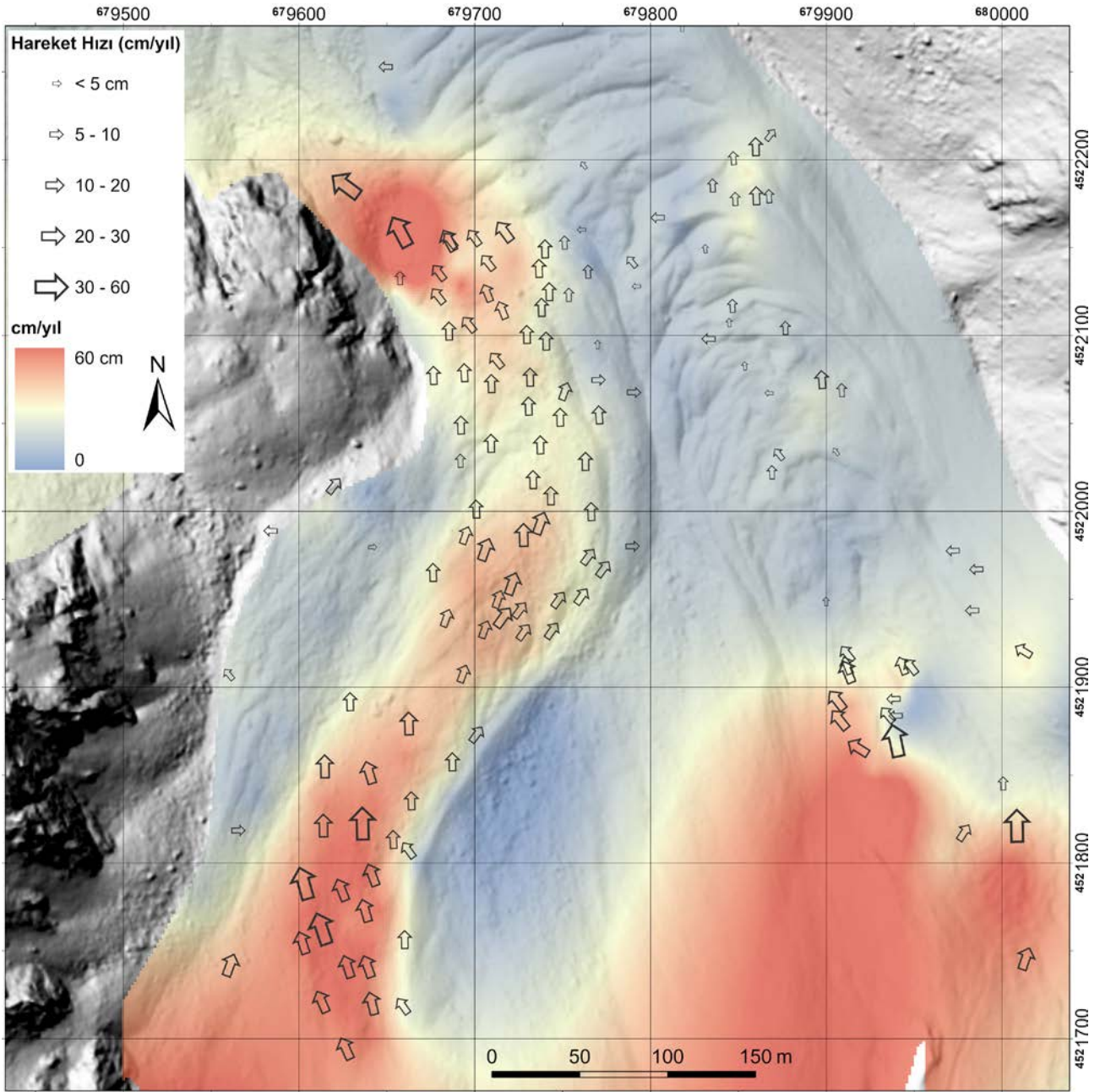
LB2'de hareket hızları LB1'in 2. Bölümünde olduğu gibi daha düşük kaydedilmiştir. 1 yıllık zaman diliminde kayda değer bir hareket hızı saptanamadığı için haritaya dahil edilmemiştir. LB3, Derebaşı KB'de aktivitesi en yüksek olan lobdur. Hareket hızı kök bölümünde ve cephede maksimuma çıkmakta, cephe gerisinde ise düşmektedir. Kök bölümünde yıllık hareket hızı 30 cm üstüne çıkmakta, cephenin u bölümünde

60 cm'ye ulaşmakla birlikte her iki bölümde ortalama 30 cm/yıl kadardır. Hareket yönü genellikle kaya buzulunun merkezine doğru eğim aşağı yönde izlenmekle birlikte, cephe bölümünde kuzey-kuzeydoğu (sağa) doğru

yönelme izlenmektedir. LB3'ün merkezi bölümü boyunca en yüksek hareket hızları izlenmekte, kenarlarda hareket hızı çoğunlukla sıfırlanmaktadır.



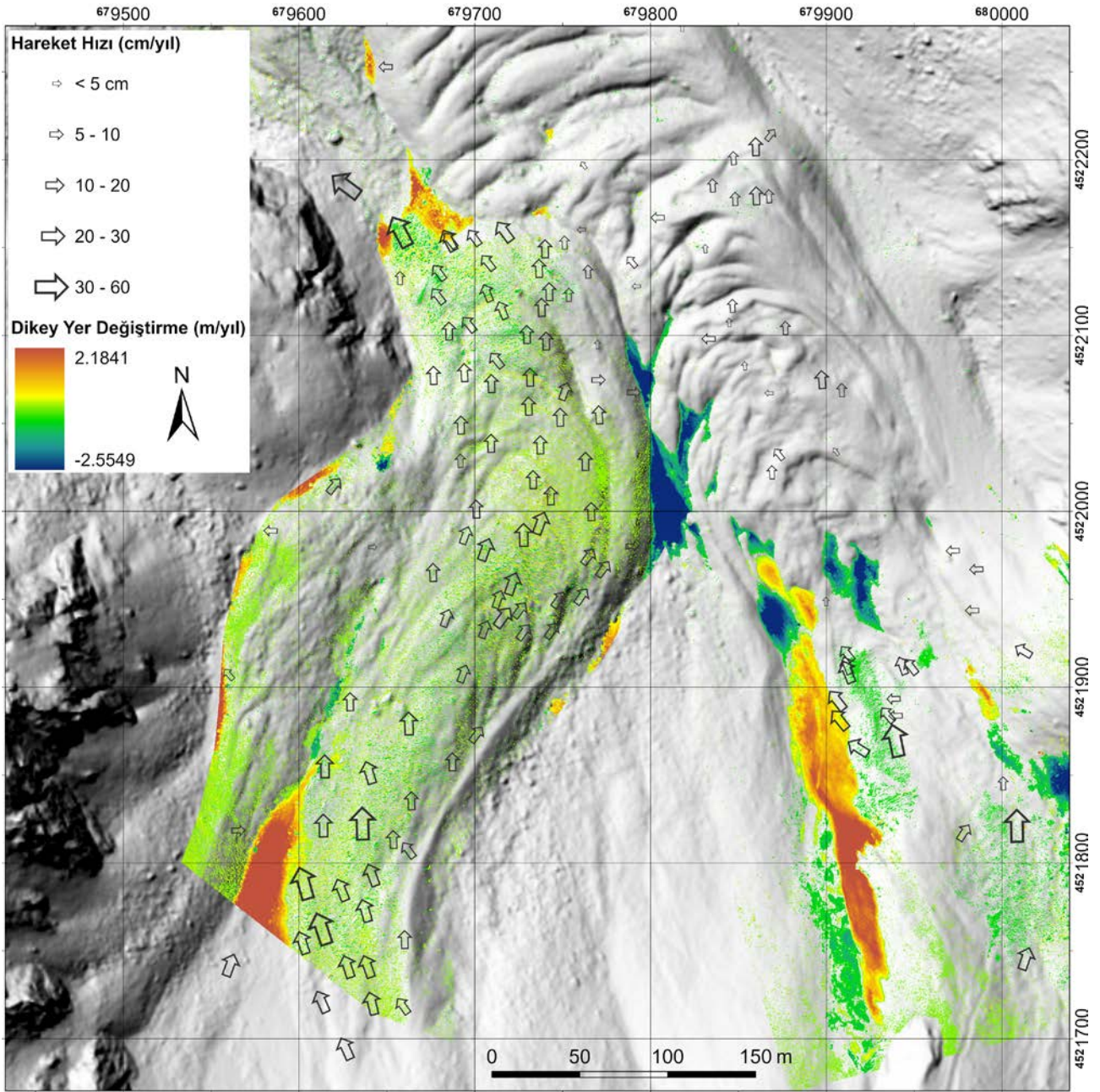
Şekil 4: Derebaşı KB yüzeyine ait arazi fotoğrafları. (a) Kök bölümü; (b) LB1'in 3. Bölümünün cephe dikliği, tam aktif bölümün başlangıcına işaret etmektedir; (c) Kaya buzulunun İHA görüntüsü, bakış yönü güneybatıdır; (d) LB1'in 2. Bölümünde volkanik kaya döküntüsü üzerinde görülen yoğun liken örtüsü; (e) LB1'in 1. Bölümünde granit litoloji ve orman gülü örtüsü / **Figure 4:** Field photographs of the Derebaşı Rock Glacier's surface. (a) Rooting zone; (b) Frontal slope of LB1's Unit 3, marking the beginning of the fully active section; (c) UAV image of the rock glacier, view towards the southwest; (d) Dense lichen cover on volcanic rock debris in LB1's Unit 2; (e) Granitic lithology and rhododendron cover in LB1's Unit 1.



Şekil 5: Derebaşı KB'da 2023-2024 döneminde bir yıllık yatay yer değıştirme hızları haritası. Sarı ve kırmızı tonlar daha hareketli bölgeleri, mavi tonlar ise nispeten stabil alanları temsil etmektedir. Siyah oklar, hareket yönünü ve yıllık yer değıştirme hızlarını göstermektedir / **Figure 5:** Annual horizontal displacement velocity map of the Derebaşı Rock Glacier for the 2023–2024 period. Yellow and red tones indicate more active regions, while blue tones represent relatively stable areas. Black arrows show the direction of movement and annual displacement rates.

Derebaşı KB'da yatay yer değıştirmelere ek olarak saptanan bir yıllık düşey yer değışimleri daha sınırlı bir alanda gözlenmiştir. Kaya buzulunun en aktif bölümü olan LB3, düşey yer değıştirmelerin de en belirgin olarak saptandığı bölümdür. Bu bölümün tamamında düşey yer değıştirme gözlenmiştir. LB3'ün cephe bölümünde ortalama 15 cm negatif yer değıştirme (yükseklik düşüşü), orta bölümünde ise ortalama 20 cm pozitif yer değıştirme (yüksekti artışı) saptanmıştır. Düşey yer

değıştirme ayrıca LB1'in kök depresyonunda sınırlı bir alanda saptanmıştır. Bu bölümde negatif yer değıştirme olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 6). 1 yıllık düşey yer değıştirmeler büyük oranda 20 cm altında gerçekleşmiştir. Şekil 6 incelendiğinde kaya buzullarının üzerinde veya kenarındaki çanaklarda belirgin düşey yer değıştirmelerin olduğu görülmektedir. Bu bölümler mevsimsel kar yamalarının oluşumu ve kaybolması ile ilişkili yükseklik değışimleri ile ilişkilidir.



Şekil 6: Derebaşı KB'da LB1'in kök bölgesi ve LB3'de 2023-2024 yılları arasındaki yıllık düşey yer değıştirme miktarları. Mavi tonlar negatif yer değıştirmeyi, kırmızı tonlar ise pozitif yer değıştirmeyi göstermektedir. Depresyon alanlarındaki koyu mavi renkler 2023 yılına ait kar yamalarını, kahverengi tonlar ise 2024 yılında oluşan kar birikim bölgelerini temsil etmektedir / **Figure 6:** Annual vertical displacement magnitudes in LB1's rooting zone and LB3 of the Derebaşı Rock Glacier between 2023 and 2024. Blue tones represent negative displacement, while red tones indicate positive displacement. Dark blue colors in depression areas correspond to snow patches from 2023, whereas red areas indicate snow accumulation zones in 2024.

4. TARTIşMA

4.1. Derebaşı Kaya Buzulu'nun Oluşum Kökeni

Kaya buzullarıyla ilgili araştırmalarda, bu oluşumların kökenine dair süregelen tartışmalar öne çıkmaktadır. Kaya buzullarının oluşum kökenine göre iki ana modelden bahsedilmektedir: bunlardan ilki periglasyal rejim koşulları altında gelişen permafrost modeli, diğeri ise glasyal koşullarda gelişen buz

çekirdekli modeldir. Permafrost modele göre kaya buzulları buz çimentolu bir matristen (kaya-buz melanjı) oluşur ve aslen talustan türemiştir (Wahrhaftig & Cox, 1959; Haeberli, 1985; Barsch, 1988). Bu modelde kaya buzulu gövdesi donmuş bir yapı sunar; içindeki buz, sedimanları bir arada tutan gözenek buzı özelliğinde olup, buz mercekleri de içerebilmektedir. Dolayısıyla permafrost sınırında gelişen bu tip kaya buzulları, dağ permafrostunun alt sınırının belirlenmesi

açısından önemli birer gösterge niteliğindedir. İkinci model olan glasyal modelde ise kaya buzullarının, geri çekilmekte veya durağan halde bulunan bir buzulun yüzeyine taşınan döküntü katmanının buzul buzunu kaplayıp gömmesiyle oluştuğu savunulur (Potter, 1972; Humlum, 1982; Benedict vd., 1986; Whalley & Martin, 1992). Bu görüşe göre, buzulun kütle dengesi söz konusu döküntüyü taşımaya yeterli gelmediğinden, yüzeydeki buzul buzunu gömülerek buz çekirdekli kaya buzulunu meydana getirir. Her iki model de mevcut ve eski iklim koşullarına dair önemli bilgiler sunma potansiyeline sahiptir; çünkü kaya buzullarının periglasyal veya glasyal kökeni, bu oluşumların geçmişteki iklim salınımları (örneğin periglasyal ve glasyal fazlar) ve bunların süreleri hakkında kritik ipuçları sunmaktadır. Örneğin periglasyal kökenli kaya buzulları permafrost sınırının zaman içindeki değişimi hakkında bilgi verirken, glasyal kökenli kaya buzulları ise kalıcı kar sınırı değişimleri ile buzul kütle dengesi hakkında önemli veriler sağlar. Ancak, kaya buzullarının donmuş gövdesinin hangi modele göre oluştuğunu belirlemek pratikte her zaman kolay olmamaktadır. Bazen bir kaya buzulunda her iki modeli yansıtan özellikler bir arada gözlenebilmektedir. Ayrıca yapılan çok sayıda çalışmaya rağmen kaya buzullarının içyapısını oluşturan permafrost katmanı veya buz çekirdeği henüz tam olarak aydınlatılamamıştır. Özellikle doğrudan sondaj ve jeofizik tabanlı çalışmaların sınırlı oluşu, bu konuda belirsizliklerin devam etmesine neden olmaktadır (Barsch vd., 1978; Haeberli vd., 1988; Musil vd., 2002; Leopold vd., 2011; Janke vd., 2015; Pavoni vd., 2023).

Türkiye’de kaya buzulları ve döküntü örtülü buzullar konusunda yapılan çalışmalar, Orta Toroslar ile Doğu Karadeniz Dağları’nda yoğunlaşmakla birlikte bu oluşumların kökeni, aktivitesi, yaşı, jeomorfolojik ve morfometrik özellikleri hakkında bilgilerimiz oldukça sınırlıdır (Löffler, 1970; Gürgen vd., 2010; Gürgen & Yeşilyurt, 2012; Çalışkan vd., 2012; Gürgen, 2016; Dede vd., 2016; Dede vd., 2017; Kaldırım, 2023; Tuncay, 2024). Büyük bir kaya buzulu olan Derebaşı KB, üç loblu bir gövde yapısına sahiptir ve loblar arasında belirgin farklılıklar olduğu görülmektedir. Her ne kadar bu alanda termokarst çökme veya

deformasyona bağlı buz mostrası gibi doğrudan buz çekirdeğini kanıtlayacak yapılar gözlenmemiş olsa da, jeomorfolojik özellikler bize önemli ipuçları sunmaktadır. Örneğin, White (1976) da kaşık biçimli kök depresyonları, merkezde menderesli sırt ve kanal yapıları ile termokarst çöküntülerini buz çekirdekli kaya buzullarının temel göstergeleri olarak tanımlamaktadır. Benzer şekilde sık ancak sığ enine sırt ve oluklar barındıran kaya buzullarının buz çekirdeği içerme olasılığının yüksektir. Ayrıca kalıcı kar sınırının kaya buzulu kök bölümüne yakın olması, oluşum sürecinde buzul kökenli bir yapının etkili olduğunu düşündürmektedir. Bu kapsamda, Derebaşı KB’nin LB3 lobundaki kalın ve şişkin gövde yapısı ile dik cephe eğimi, buz çekirdekli ve glasyal kökenli bir kaya buzulu olabileceğine yönelik güçlü kanıtlar sağlamaktadır (Şekil 2 ve 6). Aynı şekilde, LB1’in 3. bölümü de belirgin kök depresyonu ve yatay hareket hızıyla dikkat çekerek buz çekirdeği varlığına işaret etmektedir. Dolayısıyla LB3 ve LB1’in 3. bölümü, literatürde tanımlanan buz çekirdekli kaya buzulu modeline uyum sağlayan jeomorfolojik özellikler göstermektedir. Öte yandan, LB1’in 2. bölümünde izlenen derin sırt-oluk sisteminin, permafrost modeliyle ilişkilendirilen yapısal görünümü andırdığı söylenebilir. Zaman içinde buz çekirdeğini büyük ölçüde yitirmiş veya buz çimentolu matrise dönüşmüş olması da ihtimal dahilindedir; kinematik veriler bu birimin aktivitesinin daha düşük olduğu yönünde bulgular sunmaktadır. Sonuç olarak, Derebaşı KB’nin kaynak bölümleri buz çekirdekli model izlerini barındırırken, orta bölümler permafrost modelinin özelliklerini yansıtmaktadır. Bu da Derebaşı KB’nin kompleks bir jeomorfolojik gelişim sürecine sahip olduğunu ve farklı loblarda farklı oluşum modellerinin hakim olabileceğini göstermektedir.

4.2. Derebaşı Kaya Buzulu’nun Aktivitesi

Kaya buzullarının sınıflandırılmasında önemli bir ölçüt, bu oluşumların aktivite düzeyidir. Buz içeriği ve hareket hızı esas alınarak kaya buzulları; aktif, inaktif ve relikt olarak üç gruba ayrılır. Aktif kaya buzulları, içlerindeki buz çekirdeği veya kaya-buz melanjininin varlığı sayesinde sürekli hareket halindedir. İnaktif kaya buzullarında ise buz içeriği korunmakla

birlikte hareket tamamen durmuş veya çok yavaşlamıştır. Relikt kaya buzulları ise buz içeriklerini tümüyle yitirdikleri için hareketsizdir. Bu özellikler, tek bir kaya buzulu içinde kaynak alana olan mesafe arttıkça veya farklı loblar arasında değişkenlik gösterebilir. Bir kaya buzulu aktivitesini kaybettiğinde, bitki örtüsünün gelişmesi, toprak oluşumu ya da döküntü malzemesindeki kayaçların ayrışma ve oksitlenme izleri bu durumu yansıtan belirgin göstergelerdir (Baroni vd., 2004; Scotti vd., 2013). Haeberli (1985) ise aktif kaya buzullarının cephe eğimlerinde (front slope) sürekli hareket nedeniyle bitki örtüsüne rastlanamayacağını vurgular. Ayrıca aktif kaya buzullarında yüksek eğimli cephe diklikleri göze çarpar; hareket etkisiyle cephe dikliğinde taze sedimanlar ortaya çıkar ve kaya buzulu gövdesinde şişkin-bombeli bir görünüm hâkimdir (Ikeda vd., 2002; Janke vd., 2015; Wagner vd., 2020). Öte yandan fosil (relikt) kaya buzulları, daha basık bir topoğrafya sergileyip düşük eğimli cephe dikliklerinde bitki gelişimine olanak tanır. Kaya buzulları aynı zamanda dağ permafrostunun göstergeleri olup, paleoiklim koşullarının yeniden yapılandırılması ve dağ jeosistemlerinde duyarlı bir iklimsel kayıt sunmaları bakımından son derece önemlidir (Barsch, 1996; Degenhardt, 2009; Oliva vd., 2016; Alcalá-Reygosa, 2019). Güncel ve geçmiş ortam koşullarının anlaşılmasında kaya buzullarının aktivite özellikleri kritik bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, oluşum kökenlerinin belirlenmesinin yanı sıra kaya buzullarının aktivite niteliklerinin de saptanması büyük önem taşır.

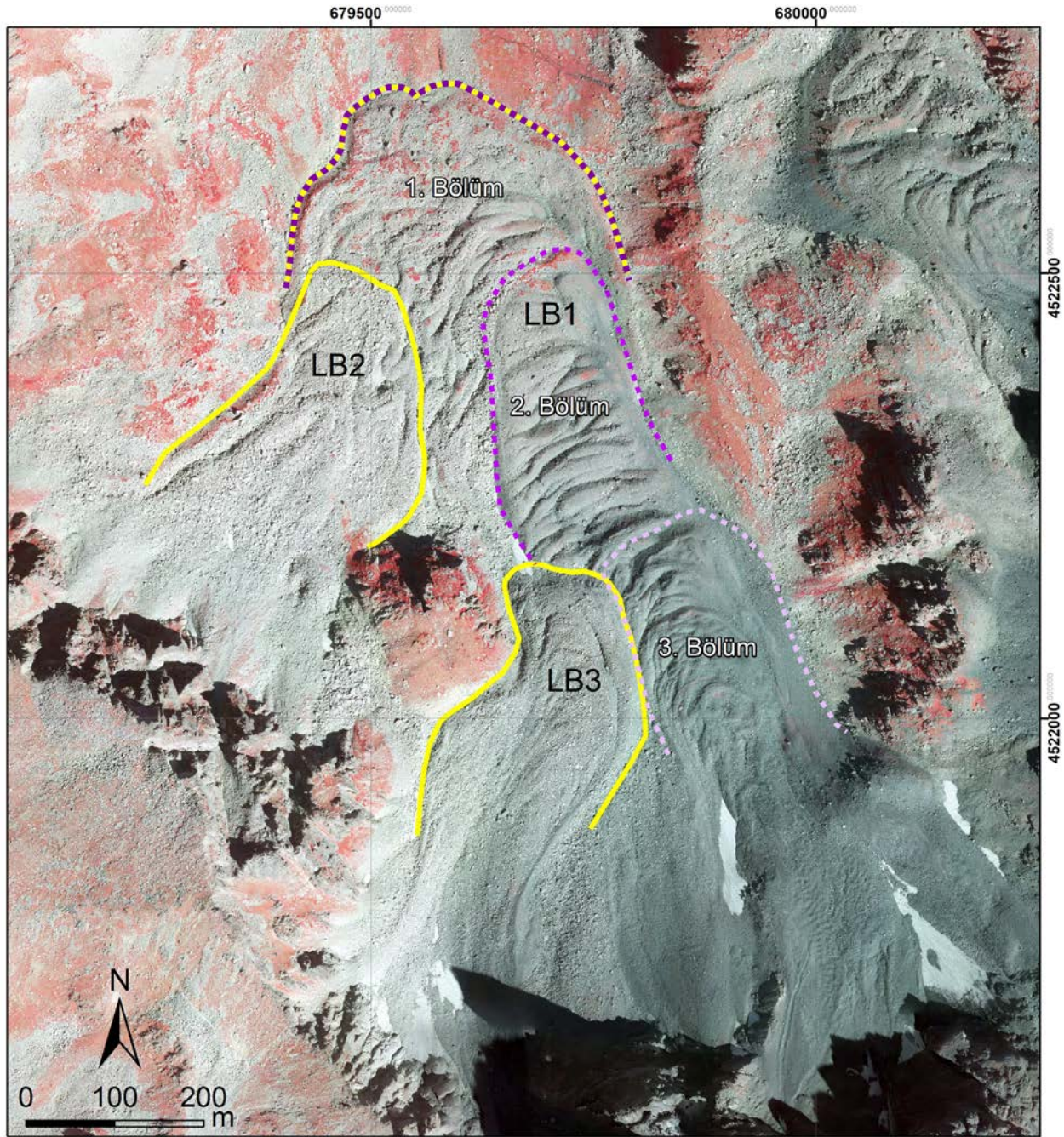
Löffler (1970), Derebaşı Kaya Buzulu'nun yüzeyini kaplayan döküntü malzemesindeki likenlerin boyutlarına göre bu kaya buzulunu aktivite özellikleri açısından sınıflandırmıştır. Buna göre, kaya buzulunun kök bölümünde (yüksek aktivite alanı) neredeyse hiç liken bulunmazken, orta kesimlerde çapı 6 cm'ye kadar ulaşan daha küçük likenler, cephe bölümlerinde ise 14 cm'ye varan daha büyük liken boyutları tespit edilmiştir. Ayrıca bitki-liken yoğunluğu ve denüdasýona bağılı renk farklılıkları, kızılötesi bantlı hava fotoğrafında da rahatlıkla ayırt edilebilmektedir (Şekil 7). Bu veriler, Derebaşı Kaya Buzulu'nun, köken sınıflandırmasında olduğu gibi aktivite

açısından da farklı özellikler gösterdiğini ortaya koyar. Kaya buzulunun cephesindeki 200 metre uzunluktaki bölümün (1. Bölüm) yüzeyinde orman gülleri ve otsu bitkiler yaygındır. Yüzey topoğrafyası basık olan bu birimde, cephe dikliği eğimi 28° ölçülmüş ve cephe yüzeyinde bitki örtüsü ve orman güllerinin geliştiği görülmüştür (Şekil 4e). İHA fotogrametrisi ve GNSS ölçümleri sonucunda, bu kısımda herhangi bir hareket veya deformasyon gözlenmemiştir. Dolayısıyla 1. bölüm, relikt kaya buzulu özelliklerinin tümünü sergilemektedir. Buna karşılık, 2. Bölüm daha şişkin bir yapı gösterir. Sadece kenar kısımlarında çok düşük hızlarda hareket saptanan bu birimin, parçalı olarak durağan olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca yüzeyinde yoğun liken gelişimi dikkat çeker. Tüm bu veriler, 2. Bölümün kısmen aktif kısmen inaktif bir yapıya (intact) sahip olduğunu göstermektedir. Öte yandan, LB1'in 3. Bölümü ile LB2 ve LB3'te fotogrametrik analizler sonucu belirgin bir aktivite olduğu görülmektedir. Söz konusu lobların kinematik ve jeomorfolojik özellikleri de bu bölümlerin aktif nitelikte olduğunu desteklemektedir. En önemli kanıtlar arasında, yüksek eğimli cephe diklikleri (39-40°), dışbükey-şişkin gövdeler ve cephelerde taze sediman yüzeylenmelerinin varlığı yer almaktadır. Ancak burda dikkat çekici olan durum, Derebaşı KB'nin en aktif bölümü olan LB3'ün özellikle cephe bölümü yüzeyinde görülen yoğun sayılabilecek liken örtüsüdür. Bu durum kaya buzulunun önceden durağan olduğunu, sonradan aktivitesinde artış gerçekleşmiş olabileceği ihtimalini doğurmaktadır. Dolayısıyla uzun süreli bir izleme programı yardımıyla bu durum açıklığa kavuşturulabilir.

Kaya buzulunun yatay hareket paternleri incelendiğinde, özellikle LB1'in 3. Bölümünde ve LB3'de dikkat çekici dinamikler göze çarpmaktadır. LB1'in aktif bölümünde, kök zonunda belirgin bir akış söz konusuyken cepheye yaklaştıkça hareket hızında önemli bir azalma gerçekleşmektedir. Bu yavaşlamada, 2. Bölümün durağan yapısının "frenleyici" etkisi olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle 3. Bölümün cephesinde sıkıştırılmalı bir akış paterni ortaya çıkar; derin enine sırt ve oluk yapıları bu sıkıştırmanın karakteristik kanıtları arasındadır

(Şekil 7). Ayrıca 3. Bölümün dil kısmı, büyük ölçüde 2. Bölümün stabilitesinden kaynaklanan bir sapma göstererek kuzeydoğu yönüne doğru akışa zorlanmaktadır. Bu durum söz konusu sıkıştırmalı morfolojinin gelişimini pekiştirmektedir. Buna karşın, LB3 ise gerilmeli bir akış modeli sergilemektedir. LB1 ile çarpıştıktan sonra kuzeybatıya yönelen bu kütle, dil bölümünün önünde yer alan derin bir çanak nedeniyle ciddi bir engelle karşılaşmadan eğim aşağı doğru akışını sürdürmektedir. Bu sebeple LB3'nin yüzeyi daha düz ve daha az engebeli bir görünümündedir. Enine sırt ve oluklar ise oldukça

sığ görünümündedir. Düşey yer değıştirme verileri de gerilmeli akışı doğrulamaktadır: Cephe kısmında alçalma, orta bölümde ise kısmen yükselme saptanmıştır. Özellikle LB3'nin orta kesimi, LB1 ile çarpışmanın gerçekleştiği bölgeye yakın olduğundan, yöndeş akışa bağlı sınırlı bir sıkışma rejimi gözlemlenmektedir. Bu çarpışma LB1'in kuzeye doğru çıkıntı yapmasının diğeri bir sebebidir. Şekil 7'de bu durum açık bir şekilde görülmektedir. LB3, LB1'in gövdesini kuzeye doğru ötelediği için LB1'de 3. Bölümden 2. Bölüme geçişte bir dirsek oluştuğu görülmektedir.



Şekil 7: Derebaşı KB'nin 2015 Eylül ayına ait yakın kızılötesi ortofoto görüntüsü. Kırmızı renk tonları bitki örtüsü ve yoğun liken varlığına işaret etmektedir / **Figure 7:** Near-infrared orthophoto of the Derebaşı Rock Glacier from September 2015. Red tones indicate vegetation and dense lichen coverage.

Derebaşı KB'deki hareket hızlarının homojen bir dağılım sergilememesi, büyük ölçüde topoğrafik etkenlere bağlanabilir. Kaya buzunun kök bölümünün boyutu, sirk duvarının yüksekliği ve genişliği gibi faktörler, bölgeye taşınan kar ve kaya döküntüsü (debris) miktarını değiştirerek beslenme koşullarını ve dolayısıyla hareket hızını etkilemektedir. Ayrıca, LB1'in kök bölümünde muhtemel Küçük Buzul Çağı (KBÇ) buzularının çekilmesinden sonra ortaya çıkan bir depresyonun, kaya buzuna yeterli kar ve döküntünün ulaşmasını geciktirdiği düşünülmektedir. Kellerer-Pirklbauer & Kaufmann (2018) ile Vivero vd. (2024) de KBÇ sonrası buzul çekilmesinin, kaya buzularının kök alanına sediman taşınım kapasitesini değiştirdiğini ve kaya buzulu alt kısmının beslenme bölgesinden kopmasına yol açarak morfolojiyi büyük ölçüde etkilediğini bildirmektedir. Bu durum, Derebaşı KB'nin ana lobundaki hareket hızında azalma yaratmış olabilir. Aynı bölgede taluslar üzerinde taze döküntü akışları gözlenmekte olup buz çekirdeğinin mevcudiyetini doğrular nitelikte önemli ipuçları sunmaktadır. Derebaşı KB'nin en aktif bölümü olan LB3'te ise KBÇ buzullaşmasına ait izlere rastlanmamaktadır. Dolayısıyla, KBÇ buzullaşmasının LB1 üzerindeki olumsuz etkileri bu lobda görülmemektedir. Aynı zamanda LB3, Derebaşı KB'nin en genç birimi olarak öne çıkar. Mevcut hareket hızına dayanarak LB3'ün, Orta Holosen döneminde oluşmaya başlamış olabileceği tahmin edilmektedir. Nitekim LB3'ün ana lobla stratigrafik bağlantısının zayıf olduğu düşünülmektedir. Başka bir deyişle bu lob LB1'den bağımsız olarak akışını sürdürmektedir. Derebaşı KB'nin 1. Bölümü olan relik bölümlerin ise Geç Glasyal sonrasında, yüksek ihtimalle Genç Dryas döneminde oluşmaya başladığı düşünülmektedir. Bu rölatif yaş değerlendirmesi, kaya buzunun doğu sınırında Akçar vd. (2007) tarafından yan moren olarak tanımlanan bir sırttan alınan kozmojenik 10^{Be} yüzeylenme yaşlarına göre yapılmıştır.

Kuzey Amerika'da yapılan çalışmalar buradaki kaya buzularının yatay akış hızlarının genellikle yıllık 1 m'den düşük olduğunu (Benedict vd., 1986; Potter vd., 1998; Liu vd., 2013; Munroe & Handwerger, 2024), öte yandan Alplerde yapılan çalışmalarda bu hareket hızının çok

daha yüksek olduğunu ve bazı kaya buzularında yıllık 10 m'yi bulduğu saptanmıştır (Krainer & He, 2006; Delaloye vd., 2010). Alpler'de kaya buzulu kinematiğine dair yürütülen uzun süreli izleme programları, kaya buzulu hareket hızlarında dönemsel artışların yaşanabildiğini ve bunun permafrost erimesiyle ilişkili olabileceğini de öne sürmektedir (Delaloye vd., 2013; Vivero vd., 2022). Ancak Derebaşı KB'de henüz uzun süreli bir izleme çalışması yapılmadığı için, bu kaya buzulundaki hareket hızlarının dönemsel değişimleri ve eğilimleri hakkında kesin bilgilere ulaşmak mümkün olmamıştır. Her ne kadar bu araştırmada kaya buzulu yüzeyindeki hareket ve yükseklik değişimleri saptanmış olsa da, yalnızca bir yıllık bir dönemi kapsıyor olması ve kaya buzulu beslenme bölgesinin tam olarak incelenememesi, kaya buzulu üzerindeki net girdi ve kütle kaybı miktarlarının belirlenmesini olanaksız kılmaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışma, Türkiye'nin büyük kaya buzularından biri olan Kaçkar Dağı'ndaki Derebaşı KB'nin jeomorfolojik yapısını ve kinematik özelliklerini analiz ederek, kaya buzunun hareket dinamikleri ve oluşum sürecine ilişkin bulgular ortaya koymuştur. Jeodezik tabanlı İHA fotogrametrisi ile oluşturulan yüksek çözünürlüklü sayısal yüzey modeli (DSM) ve ortofoto verileri kullanılarak yapılan detaylı analizler, kaya buzunun jeomorfolojik özelliklerini, yüzey hareketlerini ve aktivite seviyelerini hassas bir şekilde belirleme imkânı sunmuştur. Bu yöntem, kaya buzulu hareketlerinin yüksek doğrulukla haritalanmasında etkili bir yaklaşım olarak değerlendirilmiştir.

Derebaşı KB, dil şeklinde bir morfolojiye sahip olup, aktif, inaktif ve relik olmak üzere farklı hareketlilik seviyelerine sahip bölümler içeren karmaşık bir yapı sergilemektedir. Kaya buzunun oluşum sürecinde hem glasyal (buz çekirdekli) hem de periglasyal (permafrost) süreçlerin etkili olduğu belirlenmiştir. LB1'in orta bölümü, derin paralel sırt-oluk yapısı ve akış dinamikleri ile permafrost kökenli oluşumun karakteristik özelliklerini taşıırken, LB3 ise şişkin gövde yapısı, az engebeli yüzeyi

ve belirgin dik cephesi ile buz çekirdeği içeren bir kaya buzulu modeline işaret etmektedir. Kinematik analizler, kaya buzulundaki farklı lobların farklı hareket hızlarına sahip olduğunu ortaya koymuştur. LB1'in cephe bölümü, basık topoğrafik özellikleri, yüzeyinde gelişen bitki örtüsü ve stabil morfolojisi ile fosil (relikt) kaya buzulu karakteri sergilemektedir. LB1'in orta bölümü, yoğun liken kaplı kaya döküntüsü ve oldukça sınırlı hareket özellikleri nedeniyle düşük aktiviteli-inaktif olarak değerlendirilmiştir. Yıllık yatay hareket hızı 60 cm'ye ulaşan LB3, kaya buzulunun en aktif bölümüdür. LB1'in 3. bölümü sıkıştırılmalı bir akış paterni sergileyerek belirgin enine sırt-oluk yapılarının oluşumuna katkı sağlamaktadır. Buna karşın, LB3'te gözlenen gerilmeli akış dinamikleri, yüzeyin belirli bölgelerinde yükseklik azalmasına ve cephe gerisinde hacimsel değişimlere neden olmaktadır. Yapılan ölçümler, Derebaşı Kaya Buzulu'ndaki hareket paternlerinin büyük ölçüde topoğrafik faktörlerle ilişkili olduğunu göstermektedir. Ancak, bu hareketin permafrost istikrarsızlaşmasıyla ne derece bağlantılı olduğu tek sezonluk ölçümler nedeniyle belirlenememiştir. Ayrıca, çalışma kapsamında hesaplanan dağ permafrostunun güncel alt sınırının bu saha için 2900 metre civarında olduğu saptanmıştır.

Bu çalışmanın ortaya koyduğu bulgular, kaya buzullarının dinamik evrimi ve iklim değişikliği ile olan etkileşimlerini anlamak açısından önemli katkılar sunmaktadır. Kaya buzullarının uzun vadeli hareket dinamiklerinin belirlenmesi, sadece periglasyal süreçlerin analizi için değil, aynı zamanda dağ ekosistemlerinin sürdürülebilirliği ve iklim değişikliğinin etkilerinin değerlendirilmesi açısından da büyük önem taşımaktadır. Ek olarak uzun vadeli izleme programı ile kaya buzullarının yıllık bazda kütle dengesi bileşenlerinin analiz edilmesi ve kaya buzullarının hidrolojik döngüdeki rollerinin anlaşılmasına yardımcı olabilir. Ancak, kaya buzulunun iç yapısı ve buz miktarının daha iyi anlaşılabilmesi için jeofizik yöntemlerin (örneğin yer radarı veya elektriksel direnç tomografisi) kullanılması veya doğrudan sondaj çalışmaları ile desteklenmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra, uzun süreli izleme programları

ile dönemsel hareket değişimlerinin takip edilmesi, kaya buzullarının iklim değişikliğine karşı tepkisinin daha iyi değerlendirilmesini sağlayacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma, Türkiye'deki kaya buzullarının dinamik süreçlerini anlamaya yönelik kapsamlı bir katkı sunmakta ve gelecekte yapılacak araştırmalar için önemli bir temel oluşturmaktadır. Kaya buzullarının uzun vadeli izlenmesi, sadece bölgesel jeomorfolojik süreçler ve dinamiklerin daha iyi anlaşılmasını sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda küresel ölçekli iklim değişikliği analizlerine de ışık tutacağı düşünülmektedir.

KATKI BELİRTME VE TEŐEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 122Y373 numaralı proje ile desteklenmiştir. Projeye verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teőekkürlerimi sunarım. Saha çalışmalarına verdikleri destekten ötürü Anıl Levent Tuncay, Sebahattin Taha Gül, Hamit Koçulu ve makalenin değerlendirme aşamasında katkı sunan editörlere ve hakemlere teőekkür ederim.

KAYNAKÇA

- Akçar, N., Schlüchter, C. (2005). Paleoglaciatioin in Anatolia: a schematic review and first results. *Eiszeitalter und Gegenwart*, 55, 102–121. https://boris.unibe.ch/47000/1/Akcar_and_Schluchter_2005.pdf
- Akçar, N., Yavuz, V. S., Ivy-Ochs, S., Kubik, P. W., Vardar, M., Schlüchter, C. (2007). Paleoglacial records from Kavron Valley, NE Turkey: Field and cosmogenic exposure dating evidence. *Quaternary International*, 164-165, 170-183. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.12.020>
- Alcalá-Reygosa, J. (2019). Rock glaciers of the mountains of Mexico; a review of current knowledge and paleoclimatic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 96, 102321. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102321>.
- Baroni, C., Carton, A., Seppi, R. (2004). Distribution and behaviour of rock glaciers in the Adamello–Presanella Massif (Italian Alps). *Permafr. Periglac. Process.* 15 (3), 243–259. <https://doi.org/10.1002/ppp.497>

- Barsch, D. (1996). Rockglaciers: Indicators for the Present and Former Geoecology in High Mountain Environments. Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp. 331. ISBN: 3-540-60742-0.
- Barsch, D. (1978). Active rock glaciers as indicators for discontinuous alpine permafrost. An example from the Swiss Alps. Third International Conference on Permafrost, Edmonton, Alberta, Canada, 1, 348-353.
- Barsch, D. (1988). Rock glaciers, In: Clark MJ (ed) Advances in periglacial geomorphology. Wiley, Chichester, pp 69-90.
- Barsch, D., King, L. (1975). An attempt to date fossil rock glaciers in Giron, Swiss Alps. *Questiones Geographicae* (Poznan), 2, 5-14.
- Benedict, J.B., Benedict, R.J., Sanville, D. (1986). Arapaho rock glacier, Front Range, Colorado, USA: A 25-Year Resurvey. *Arctic and Alpine Research*, 18(3), 349-352.
- Buckel, J., Reinosch, E., Voigtländer, A., Dietze, M., Bucker, M., Krebs, N., Schroeckh, R., Mäusbacher, R., Hördt, A. (2022). Rock glacier characteristics under semiarid climate conditions in the Western Nyainqentanglha Range, Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 127(1), e2021JF006256. <https://doi.org/10.1029/2021jf006256>.
- Chiba, T., Kaneta, S.I., Suzuki, Y. (2008). Red relief image map: New visualization method for three dimensional data. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XXXVII. Part B2. Beijing. https://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/2_pdf/11_ThS-6/08.pdf
- Chu, H.J., Chen, Y.C., Ali, M.Z., Hofle, B. (2019). Multi-Parameter Relief Map from High-Resolution DEMs: A Case Study of Mudstone Badland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(7), 1109. <https://doi.org/10.3390/ijerph16071109>.
- Çalışkan, O., Gürgen, G., Yılmaz, E., Yeşilyurt, S. (2012). Bolkar Dağları Kuzeydoğusunun Glasyal Morfolojisi ve Döküntüyle Örtülü Buzullar. *Uluslararası İnsani Bilimler Dergisi*, 9(1), 889-910. https://arastirmax.com/en/system/files/dergiler/161047/makaleler/9/1/arastirmx_161047_9_pp_890-911.pdf
- Dede, V. (2023). Karçal Dağları'nın Buzul Jeomorfolojisi ve 36Cl Kozmojenik Jeokronolojisi. 1. Baskı, 200 s., Kriter Yayınevi, No: 45353, ISBN: 978-625-6894-46-4.
- Dede, V., Çiçek, İ., Uncu, L. (2015). Karçal Dağları'nda Kaya Buzulu Oluşumları. *Hacettepe Üniversitesi, Yerbilimleri Dergisi*, 36(2), 61-80. <https://doi.org/10.17824/yrb.90910>.
- Dede, V., Çiçek, İ., Sarıkaya, M.A., Çiner, A., Uncu, L. (2017). First cosmogenic geochronology from the lesser Caucasus: late pleistocene Pleistocene glaciation and rock glacier development in the Karçal Valley, NE Turkey. *Quat Sci Rev* 164, 54-67. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.03.025>
- Degenhardt, J.J. (2009). Development of tongue-shaped and multilobate rock glaciers in alpine environments – Interpretations from ground penetrating radar surveys. *Geomorphology* 109(3-4): 94-107. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.02.020>
- Delaloye, R., Lambiel, C., Gartner-Roer, I. (2010). Overview of Rock Glacier Kinematics Research in the Swiss Alps: *Geographica Helvetica*, vol. 65, pp. 135-145. <https://doi.org/10.5194/gh-65-135-2010>, 2010
- Delaloye, R., Morard, S., Barboux, C., Abbet, D., Gruber, V., Riedo, M., Gachet, S. (2013). Rapidly moving rock glaciers in Mattertal. *Jahrestagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft*, 21-31. [https://bigweb.unifr.ch/Science/Geosciences/Gemorphology/Pub/Website/Papers/Delaloye_et_al_\(2013\)_SSGm_Rapidly_moving_rock_glaciers.pdf](https://bigweb.unifr.ch/Science/Geosciences/Gemorphology/Pub/Website/Papers/Delaloye_et_al_(2013)_SSGm_Rapidly_moving_rock_glaciers.pdf)
- Doğru, A.F., Somuncu, M., Çiçek, İ., Tunçel, H., Gürgen, G. (1993). Kaçkar Dağı'nda buzul şekilleri, yaylalar ve turizm. *Ankara Üniversitesi, Türkiye Coğrafyası Araştırma ve Uygulama Merkezi Dergisi*, 2, 157-184.
- Eriç, S. (1949). Eiszeitliche Formen und gegenwärtige Verletscherung im nordostanatolischen Randgebirge. *Geologische Rundschau*, 37, 75-83.
- Giardino, J.R., Regmi, N.R., Vitek, J.D. (2011). Rock Glaciers. In: *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*. Editors: Singh, V.J., Singh, P., Haritashya, U.K., Springer, Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_453
- Giardino, J.R., Vitek, J.D. (1988). The significance of rock glaciers in the glacial-periglacial landscape continuum. *J. Quat. Sci.* 3, 97-103.
- Gürgen, G. (2019). Çatakkaya Döküntü Örtülü Buzulu (Tatos Dağları). *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 17(1), 217-236. <https://doi.org/10.33688/aucbd.536616>.

- Gürgen, G., alışkan, O., Yılmaz, E., Yeşilyurt, S. (2010). Yedigöller Platosu ve Emli Vadisinde (Aladağlar) Döküntü Örtülü Buzullar. e Journal of New Science Academy, 5(2), 98-116.
- Gürgen, G., Yeşilyurt, S. (2012). Karçal Dağı Buzulları (Artvin). Coğrafi Bilimler Dergisi, 10 (1), 91-104. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/aucbd/issue/44469/551196>
- Güven, İ.H. (1998). 1/100.000 ölçekli açınsama nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları, No. 58, Trabzon C29 ve D29 paftaları: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayını, Ankara.
- Haeberli, W. (1985). Creep of mountain permafrost: internal structure and flow of Alpine rock glaciers. Mitteilung VAW/ETHZ, 77, 142 pp.
- Haeberli, W., Arenson, L.U., Wee, J., Hauck, C., Mölg, N. (2024). Discriminating viscous-creep features (rock glaciers) in mountain permafrost from debris-covered glaciers – a commented test at the Gruben and Yerba Loca sites, Swiss Alps and Chilean Andes. The Cryosphere, 18(4), 1669-1683. <https://doi.org/10.5194/tc-18-1669-2024>.
- Haeberli, W., Hallet, B., Arenson, L., Elconin, R., Humlum, O., Kääb, A., Kaufmann, V., Ladanyi, B., Matsuoka, N., Springman, S., Mühl, D. (2006). Permafrost creep and rock glacier dynamics. Permafrost and Periglacial Processes, 17(3), 189–214. <https://doi.org/10.1002/ppp.561>.
- Haeberli, W., Huder, J., Keusen, H.-R., Pika, J., Röthlisberger, H. (1988). Core drilling through rock-glacier permafrost. In Fifth International Conference on Permafrost, Trondheim, Proceedings, 2, 937-942.
- Haeberli, W., King, L., Flotron, A. (1979). Surface Movement and Lichen-Cover Studies at the Active Rock Glacier near the Grubengletscher, Wallis, Swiss Alps. Arctic and Alpine Research, Vol. 11(4), 421-441.
- Heid, T., Kääb, A. (2012). Evaluation of existing image matching methods for deriving glacier surface displacements globally from optical satellite imagery. Remote Sensing of Environment, 118, 339–355. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.024>.
- Hendrickx, H., Vivero, S., De Cock, L., De Wit, B., De Maeyer, P., Lambiel, C., Delaloye, R., Nyssen, J., Frankl, A. (2019). The reproducibility of SfM algorithm to produce detailed Digital Surface Models: The example of PhotoScan applied to a high-alpine rock glacier. Remote Sensing Letters, 10, 11–20. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2018.1519641>.
- Humlum, O. (1988). Rock glacier appearance level and rock glacier initiation line altitude: a methodological approach to the study of rock glaciers. Arctic and Alpine Research, 20(2), 160-178. <https://doi.org/10.1080/00040851.1988.12002662>.
- Ikeda, A., Matsuoka, N. (2002). Degradation of talus-derived rock glaciers in the Upper Engadin, Swiss Alps. Permafrost and Periglacial Processes, 13, 145–161. <https://doi.org/10.1002/ppp.413>.
- Janke, J. R., Frauenfelder, R. (2008). The relationship between rock glacier and contributing area parameters in the Front Range of Colorado. Journal of Quaternary Science, 32(2), 153–163. <https://doi.org/10.1002/jqs.1133>.
- Janke, J.R., Bellisario, A.C., Ferrando, F.A. (2015). Classification of debris-covered glaciers and rock glaciers in the Andes of central Chile. Geomorphology, 241, 98-121. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.034>.
- Jones, D.B., Harrison, S., Anderson, K., Betts, R.A. (2018). Mountain rock glaciers contain globally significant water stores. Scientific Reports, 8(1), 2834. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21244-w>.
- Kääb, A. (2013). Rock glaciers and protalus forms. In: The Encyclopedia of Quaternary Science, SA Elias (ed). Elsevier: Amsterdam, 535–541. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53643-3.00104-7>.
- Kaldırım, B. (2023). Ovit Vadisi'nin Glasyal Ve Periglasyal Jeomorfolojisi; Güncel Veri Ve Yöntemler Işığında Bir Değerlendirme. Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Basılmamış Yüksek Lisans Tezi.
- Kaneda, H., Chiba, T. (2019). Stereopaired Morphometric Protection Index Red Relief Image Maps (Stereo MPI-RRIMs): Effective Visualization of High-Resolution Digital Elevation Models for Interpreting and Mapping Small Tectonic Geomorphic Features. Bulletin of the Seismological Society of America, 109(1), 99–109. <https://doi.org/10.1785/0120180166>.
- Kellerer-Pirklbauer, A., Kaufmann, V. (2018). Deglaciation and its impact on permafrost and rock glacier evolution: New insight from two adjacent cirques in Austria. Science of The Total Environment, 621, 1397-1414. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.087>.
- Knight, J., Harrison, S., Jones, D.B. (2019). Rock glaciers and the geomorphological evolution of deglaciating mountains. Geomorphology, 324,

- 14–24.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.09.020>.
- Krainer, K., He, X. (2006). Flow velocities of active rock glaciers in the Austrian Alps. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 88, 267–280. <https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.2006.00300.x>.
- Krenek, L. (1932). Gletscher im Pontischen Gebirge (Lasistan). *Zeitschrift für Gletscherkunde*, 20, 129-131, Bildtafel XV u. XVI.
- Lane, S.N., Westaway, R.M., Hicks, D.M. (2003). Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, 249–271. <https://doi.org/10.1002/esp.483>.
- Leopold, M., Williams, M.W., Caine, N., Völkel, J., Dethier, D. (2011). Internal structure of the Green lake 5 rock glacier, Colorado Front Range, USA. *Permafrost and Periglacial Processes*, 22(2), 107–119. <https://doi.org/10.1002/ppp.706>.
- Liu, L., Millar, C.I., Westfall, R.D., Zebker, H.A. (2013). Surface motion of active rock glaciers in the Sierra Nevada, California, USA: inventory and a case study using InSAR. *Cryosphere* 7, 1109–1119. <https://doi.org/10.5194/tc-7-1109-2013>
- Löffler, E. (1970). Untersuchungen zum eiszeitlichen und rezenten klimagenetischen Formenschatz in den Gebirgen Anatoliens. *Heidelberger Geographische Arbeiten*, 27, 162 p.
- Messerli, B., Zurbuchen, M. (1968). Block-gletscher im Weissmies und Aletsch und ihre photogrammetrische Kartierung. *Die Alpen*, 3, 139–152.
- Munroe, J.S., Handwerger, A.L. (2024). Contemporary movement of rock glaciers in the La Sal and Uinta Mountains, Utah, USA. *Quaternary Science Advances*, 14, 100188. <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2024.100188>.
- Musil, M., Maurer, H., Green, A.G., Horstmeyer, H., Nitsche, F.O., Mühlill, D.V., Springman, S. (2002). Shallow seismic surveying of an Alpine rock glacier. *Geophysics*, 67(6), 1701–1710. <https://doi.org/10.1190/1.1527071>.
- Oliva, M., Žebre, M., Guglielmin, M.M., Hughes, P., Çiner, A., Viera, G., Bodin, X., Andrés, N., Colucci, R.R., García-Hernández, C.A., Mora, C.A., Nofre, J., Palacios, D., Pérez-Alberti, A., Ribolini, A., Ruiz-Fernández, J., Sarıkaya, M.A., Serrano, E., Urdea, P., Valcárcel, M., Woodward, J., Yıldırım, C. (2018). Permafrost conditions in the Mediterranean basin since the Last Glaciation. *Earth Science Reviews*, 185, 397–436. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.06.01>.
- Oruç, M.E., Ulvi, A. (2023). Maden Sahalarındaki Deformasyonların İHA'lar ile İzlenmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 5(2), 43-57. <https://doi.org/10.53030/tufod.1332958>.
- Pavoni, M., Boaga, J., Wagner, F.M., Bast, A., Phillips, M. (2023). Characterization of rock glaciers environments combining structurally-coupled and petrophysically-coupled joint inversions of electrical resistivity and seismic refraction datasets. *Journal of Applied Geophysics*, 215, 105097. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.105097>.
- Potter, N. (1972). Ice cored rock glaciers, Galena Creek northern Absaroka Mountains, Wyoming. *Geological Society of America Bulletin*, 83, 3025-3058. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1972\)83\[3025:IRGGCN\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1972)83[3025:IRGGCN]2.0.CO;2).
- Potter, N., Steig, E.J., Clark, D.H., Speece, M.A., Clark, G.T., Updike, A.B. (1998). Galena Creek rock glacier revisited—New observations on an old controversy. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 80, 251–265. <https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.1998.00041.x>.
- Reber, R., Akçar, N., Tikhomirov, D., Yeşilyurt, S., Vockenhuber, C., Yavuz, V., Ivy-Ochs, S., Schlüchter, C. (2022). LGM Glaciations in the Northeastern Anatolian Mountains: New Insights. *Geosciences*, 12, 257, 1-22. <https://doi.org/10.3390/geosciences12070257>.
- Scapozza, C., Lambiel, C., Bozzini, C., Mari, S., Conedera, M. (2014). Assessing the rock glacier kinematics on three different timescales: A case study from the southern Swiss Alps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(15), 2056-2069. <https://doi.org/10.1002/esp.3599>.
- Scotti, R., Brardinoni, F., Alberti, S., Frattini, P., Crosta, G.B. (2013). A regional inventory of rock glaciers and protalus ramparts in the central Italian Alps. *Geomorphology*, 186, 136–149. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.028>.
- Tuncay, A.L. (2024). Aladağlar'daki Kaya Buzullarının Envanteri, Dağılışı Ve Morfolojik Özellikleri (Tez No: 869524) [Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Yök Tez Merkezi].
- Türk, T., Öcalan, T. (2020). PPK GNSS Sistemine Sahip İnsansız Hava Araçları İle Elde Edilen Fotogrametrik Ürünlerin Doğruluğunun Farklı Yaklaşımlarla İrdelenmesi. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 2(1), 22-28.

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/tufod/issue/53476/693407>

- Uysal, M., Toprak, A.S., Polat, N. (2015). DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. *Measurement* 73, 539-543. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.06.010>.
- Vivero, S., Hendrickx, H., Frankl, A., Delaloye, R., Lambiel, C. (2022). Kinematics and geomorphological changes of a destabilising rock glacier captured from close-range sensing techniques (Tsarmine rock glacier, Western Swiss Alps). *Frontiers in Earth Science*, 10, 1017949. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1017949>.
- Vivero, S., Lambiel, C. (2024). Annual surface elevation changes of rock glaciers and their geomorphological significance: Examples from the Swiss Alps. *Geomorphology*, 467. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109487>.
- Wagner, T., Brodacz, A., Krainer, K., Winkler, G. (2020). Active rock glaciers as shallow groundwater reservoirs, Austrian Alps. *Grundwasser*, 25, 215-230. <https://doi.org/10.1007/s00767-020-00455-x>.
- Wahrhaftig, C., Cox, A. (1959). Rock glaciers in the Alaska Range. *Geological Society of America Bulletin*, 70, 383/436. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1959\)70\[383:RGITAR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1959)70[383:RGITAR]2.0.CO;2).
- Wayne, W.J. (1981). Ice segregation as an origin for lenses of non-glacial ice in "ice-cemented" rock glaciers. *Journal of Glaciology*, 27(97), 506–510. <https://doi.org/10.3189/S0022143000011564>.
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>.
- Whalley, W.B., Martin, H.E. (1992). Rock glaciers: II models and mechanisms. *Progress in Physical Geography*, 16(2), 127–186. <https://doi.org/10.1177/030913339201600201>.
- Wheaton, J.M., Brasington, J., Darby, S.E., Sear, D.A. (2010). Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 136–156. <https://doi.org/10.1002/esp.1886>.
- White, S.E. (1976). Rock glaciers and block fields, review and new data. *Quaternary Research*, 6, 77-97. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(76\)90041-7](https://doi.org/10.1016/0033-5894(76)90041-7).
- Yeşilyurt, S., Doğan, U., Akęar, N. (2018). Narlıca Vadisi'nde Geç Kuvaterner buzullaşma izleri, Kavuşşahap Dağları. *Türk Coğrafya Dergisi*, 70, 99-108. <https://doi.org/10.17211/tcd.415232>.
- Yılmaz, E., Yeşilyurt, S. (2023). Yer Sistem Modellerinin Son Buzul Maksimumu İklim Ardgörülerinin Holdridge Biyomları ve Paleobuzul Alanları ile Değerlendirilmesi. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 21(2), 394-426. <https://doi.org/10.33688/aucbd.1290590>.