



TMMOB
JEOLOJİ MÜHENDİSLERİ ODASI YAYINIDIR

Mavi Gezegem

Popüler Yerbilim Dergisi

Yıl 2023 • Sayı 31

ISSN: 1302-4108



- Ulusal Kutup Bilim Seferleri
- Bir Yer Bilimcinin Gözünden Antarktika: 7. Ulusal Antarktika Bilim Seferi (TAE-VII)
- PERMAFROST: İklim değişiminde zaman ayarlı bir tehdit
- Buzul İzostatik Dengeleme (GIA) ve Horseshoe Adası'nda (Batı Antarktika Yarımadası) Bulunan Yükselmiş Basamaklı Kıyı Yapılarının Önemi
- Antarktika Gölleri
- Antarktik Mikrometeoritler

**TMMOB
JEOLOJİ MÜHENDİSLERİ ODASI
Chamber of Geological Engineers of Turkey**

YÖNETİM KURULU / EXECUTIVE BOARD

Hüseyin ALAN	Başkan / <i>President</i>
M. Emre KIBRIS	İkinci Başkan / <i>Vice President</i>
Buket YARARBAŞ ECEMİŞ	Yazman / <i>Secretary</i>
Seçkin GÜLBUDAK	Sayman / <i>Treasurer</i>
Işık Şener AYDEMİR	Yayın Üyesi / <i>Member of Publication</i>
Hüseyin AKKUŞ	Mesleki Uygulamalar Üyesi / <i>Member of Professional Activities</i>
Özgür DEĞİRMENCİ	Sosyal İlişkiler Üyesi / <i>Member of Social Affairs</i>

EDİTÖR

Prof. Dr. Cüneyt ŞEN
Karadeniz Teknik Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü
e-posta: csen@ktu.edu.tr

MİSAFİR EDİTÖR

Prof. Dr. Burcu ÖZSOY

YRD. EDİTÖRLER

Prof. Dr. Raif KANDEMİR
Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi
Jeoloji Mühendisliği Bölümü
e-posta: raif.kandemir@erdogan.edu.tr

YAZARLAR / WRITERS

Sinan Yirmibeşoğlu
Özgün Oktar
Burcu Özsoy
Raif Kandemir
Alper Gürbüz
Mustafa Şenkaya
Mehmet Korhan Erturaç
Sevval Yalçinkaya Bay
Taki Sönmez
Namık Aysal

Dr. Tülay BAK
Karadeniz Teknik Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü
e-posta: tulaybak@ktu.edu.tr

Tasarım/Mizanpaj

İlhan ULUSOY

Yazışma Adresi

TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası
PK. 464 Yenışehir, 06410 Ankara
Tel: (0312) 434 36 01
Faks: (0312) 434 23 88
E-Posta: jmo@jmo.org.tr
URL: www.jmo.org.tr

Yayın Türü

: Yaygın Süreli Yayın

Yayının Şekli

: Yıllık

Yayın Sahibi

: TMMOB JMO Adına Hüseyin ALAN

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü

: Hüseyin ALAN

Yayının İdari Adresi

: Hatay 2 Sokak No: 21 Kocatepe / Ankara Tel: 0 312 432 30 85 Faks: 0 312 434 23 88

Baskı (Printed by)

: ERS Matbaacılık Kazım Karabekir Cad. Altıntop İşhanı No: 87/7 İskitler / Ankara Tel: 0 312 384 54 88

Baskı Tarihi

: Aralık 2023

Baskı Adedi

: 500



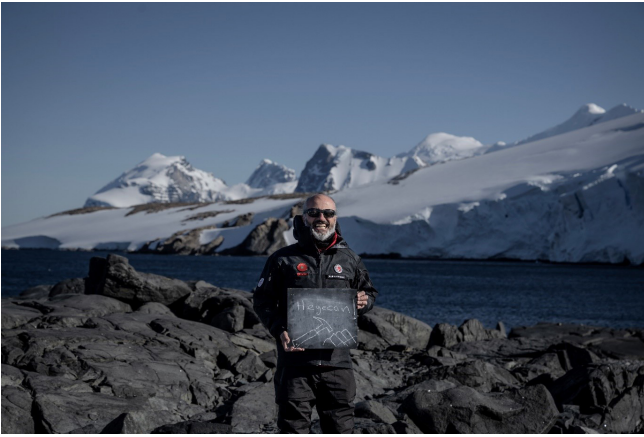
İçindekiler



Ulusal Kutup Bilim Seferleri 7



Buzul İzostatik Dengeleme (GIA) ve Horseshoe Adası'nda (Batı Antarktika Yarımadası) Bulunan Yükselmiş Basamaklı Kıyı Yapılarının Önemi 31



Bir Yer Bilimcinin Gözünden Antarktika: 7. Ulusal Antarktika Bilim Seferi (TAE-VII) 13



Antarktika Gölleri 37



Permafrost İklim değişikliğinde zaman ayarlı bir tehdit

PERMAFROST İklim değişikliğinde zaman ayarlı bir tehdit 23



Antarktik Mikrometeoritler 43

Sunuş

Cumhuriyetimizin 100. Yılı'nı kutladık. Hepimize kutlu olsun.

Ülkemizde her alanda olduğu gibi bilim alanında da son yüz yılda önemli çalışmalar yapıldı. Cumhuriyet aydınlanmasının Türk bilim insanları üzerindeki yansımaları, temel bilimlerden sağlık bilimlerine, mühendislikten yer bilimlerine kadar her alanda büyük başarılarla imza atmaları oldu. Bu sayımızı Türk bilim insanlarının 1960'lı yıllarda ilgi duymaya başladığı **"Antarktika"** çalışmalarına ayırdık.

31. sayımızın Editör Kurulu konduğu TÜBİTAK MAM Başkan Vekili ve aynı zamanda Kutup Araştırmaları Enstitüsü Müdürü sayın Prof. Dr. Burcu Özsoy. Ülkemizin kutup çalışmalarıyla ilgili stratejilerinin oluşturulmasında büyük katkı sunan sayın Özsoy'un Sunuş'u ile **Mavi Gezegen Antarktika Özel Sayısı** başlıyor.

Türk Bilim insanları artık, gezegenimiz üzerinde bilim açısından en zorlu saha koşullarına, insan yaşamını neredeyse imkânsız kılan doğa unsurlarına ve yüksek maliyetli lojistik gerekliliklere sahip olan Antarktika kıtasında bilimsel çalışmalar yapıyor. Ülkemizin Antarktika ve Arktik bölgelere yapmış olduğu bilimsel seferler **"Ulusal Kutup Bilim Seferleri"** başlığı altında düzenleyicileri tarafından anlatıldı.

Antarktika, benim için "Heyecan" anlamına geliyor diyen, Cumhuriyetin 100. yılında gerçekleştirilen VII. Ulusal Antarktika Bilim seferine katılan Dergimizin Editör Kurulu üyesi Prof. Dr. Raif Kandemir'in, sefer ve Horseshoe Adası'ndaki Türk Bilim Üssü'ndeki çalışmaları ve gözlemleri **"Bir Yer Bilimcinin Gözünden Antarktika: 7. Ulusal Antarktika Bilim Seferi (TAE-VII)"** yazısında.

Küresel ısınmanın kutuplar için tehlikeli sonuçlarından birisi de kutup bölgelerindeki donmuş alanların çözülmesidir. Yalnız yer bilimciler permafrost çözülmesinin gezegenimiz açısından olası sonuçlarının neler olabileceğini jeolojik geçmişte meydana gelmiş ve canlılar açısından oldukça dramatik sonuçları olmuş pek çok olayın jeolojik kayıtlarından çıkarsayabiliyor. **"Permafrost: İklim değişikliğinde zaman ayarlı bir tehdit"**, bu ilginç yazıda permafrost çözümlerinin olası sonuçları tartışılıyor. Buzulların erimesiyle değişecek olan izostatik denge **"Buzul İzostatik Dengeleme (GIA) ve Horseshoe Adası'nda (Batı Antarktika Yarımadası) Bulunan Yükselmiş Basamaklı Kıyı Yapılarının Önemi"** ile irdeleniyor.

"Antarktika Gölleri", küresel ısınmanın tetiklediği Antarktik kıta buzullarında bulunan hala keşfedilmemiş farklı sınıflarda gölleri tanıtıyor. Antarktika meteorit araştırmaları için kapalı bir sistemdir. **"Antarktik Mikrometeoritler"** insan aktivitesinin çok az olduğu ve kozmik tozların herhangi bir yersel örnek ile karışmadığı kıtadaki mikrometeorit çalışmaları hakkında bilgi veriyor.

Cumhuriyetimizin 100. Yılı Kutlu Olsun. Nice Yüzyıllara

Editörler Kurulu

Antarktika Özel Sayı Şunuş

Kutup Bölgeleri, yalnızca benzersiz ekosistemleriyle değil, aynı zamanda küresel iklim dinamiklerini anlamada oynadıkları kritik rol ve bilimsel araştırmalar için sundukları potansiyel ile de ön plana çıkmaktadır. Türkiye, 2017 yılında Cumhurbaşkanlığı himayesinde ve Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı koordinasyonunda Ulusal Kutup Bilim Programı'nı hayata geçirmiştir. Bu program altında, TÜBİTAK çatısı altında kurulan Kutup Araştırmaları Enstitüsü, 2019'dan itibaren hem Arktik (TASE) hem de Antarktika'da (TAE) gerçekleştirilen Ulusal Bilimsel Seferler'i koordine etmektedir. Tüm bu girişimler, ulusal düzeyde yürütölen bilimsel çalışmalar ve teknolojik yeniliklerle Kutup Bölgeleri hakkında daha derin bir anlayış geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu süreç, bilimsel bilgi birikimini genişletmenin yanı sıra, en zorlu çevre koşullarında bile teknolojinin nasıl güçlü bir etken olabileceğini gösteren önemli bir adımdır.

Bu yıl yayımlanan 2023-2035 Ulusal Kutup Bilim Stratejisi kapsamında, Kutup Bölgeleri'nde gerçekleştirilecek araştırmaların beş ana temaya odaklanması kararlaştırılmıştır. Bu temalar; "Küresel İklim Değişikliği"ne yönelik olarak, bu bölgelerin küresel iklim üzerindeki etkilerinin detaylı bir şekilde incelenmesi; «Tehdit Altındaki Ekosistemler» bağlamında, kutuplar ve çevresindeki hassas habitatların korunması ve sürdürülebilirliği için stratejik yaklaşımların geliştirilmesi; «Antropojenik Etkiler ve Sosyal Sistemler» üzerine, insan faaliyetlerinin kutup ekosistemleri üzerindeki etkilerinin ve bu etkileşimlerin sosyal yapılarla olan yansımalarının araştırılması; "Uzaya Bakış" perspektifiyle, kutup bölgelerinde yürütölen araştırmaların uzay bilimleriyle olan etkileşiminin ve bu iki disiplinin birbirini nasıl destekleyebileceğinin ele alınması; ve, "Geçmişten Geleceğe Bakmak" teması altında, iklim kayıtları ve jeolojik bulgular ışığında, kutupların geçmişinin incelenmesi ve bu bilgilerin geleceğe yönelik öngörülerde nasıl kullanılabileceği şeklindedir.

Bu özel sayıda yer alan jeolojik araştırmalar, özellikle "Geçmişten Geleceğe Bakmak" stratejisiyle uyumlu olarak, gelecekteki çevresel ve iklimsel değişikliklere dair anlayışımızı derinleştirmesi ve Kutup Bölgeleri'nde çalışmalar yürüten yer bilimleri araştırmacılarımızın Türkçe literatüre önemli bir katkısı olarak dikkat çekmektedir.

Özel sayının hazırlanmasında emeği geçen tüm bilim insanlarına ve Mavi Gezegen Dergisi'nin yayın kurulu ile üretim ekibine en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Prof. Dr. Burcu Özsoy



Ulusal Kutup Bilim Seferleri

Gezegemizde bilim açısından en zorlu saha koşullarına, insan yaşamını neredeyse imkânsız kılan doğa unsurlarına ve yüksek maliyetli lojistik gerekliliklere sahip olan Antarktika kıtası, son yıllarda Türk bilim insanlarının kutup bilimleri araştırmalarına ev sahipliği yapmaktadır. Ülkemizin donmuş kıtaya gerçekleştirdiği İlk Ulusal Antarktika Bilim Seferi 2017 yılında başlamış olup her yıl Antarktika'nın yaz dönemlerinde TÜBİTAK MAM Kutup Araştırmaları Enstitüsü koordinasyonunda düzenli olarak devam ettirilmektedir. Çalışmalar sonucunda yeni canlı türlerinin keşiflerinden, dünyanın geçmişine dair verilere ve iklim değişikliğinin etkilerine kadar birçok çarpıcı gerçek gün yüzüne çıkartılmaktadır.

Sinan Yirmibeşoğlu

TÜBİTAK MAM Kutup Araştırmaları Enstitüsü,
İstanbul Teknik Üniversitesi

Özgün Oktar

TÜBİTAK MAM Kutup Araştırmaları Enstitüsü,
İstanbul Teknik Üniversitesi

Burcu Özsoy

TÜBİTAK MAM Kutup Araştırmaları Enstitüsü,
İstanbul Teknik Üniversitesi

Giriş

İnsanoğlu 1800'lü yıllara geldiğinde Dünya üzerindeki en son kıta olan Antarktika'yı keşfe ve detaylı incelemeye başladı. Kıtanın keşfinde farklı milletler rol oynasa da Türk bilim insanları tarihi belgeleme baktığımızda özellikle 1900'lü yılların sonlarına doğru diğer ülkelerin bilim seferlerine katılarak önemli bilimsel araştırmalar gerçekleştirmiştir. Bunlardan en bilinenleri arasında üç değerli bilim insa-

nımızın isimlerinin Kıta'da belirli bölgelere verilmiş olmasıdır; Karaali Kayalıkları, İnan Tepesi ve Tilav Buzdili [1].

İkinci Dünya Savaşı sonrasında 1 Aralık 1959 tarihinde bir araya gelen 12 ülkenin imzasıyla başlayan "Antarktika Antlaşması", günümüzde 54 ülke tarafından tanınmış durumdadır. Ülkemizin antlaşmaya taraf olması 1995-1996 yıllarında gerçekleşmiştir. Fakat bu tarihten 2017 yılına kadar herhangi bir ulusal sefer düzenlenememiştir. 2017 yılına gelindiğinde ise T.C. Cumhurbaşkanlığı himayelerinde dönemin Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı uhdesinde ve İstanbul Teknik Üniversitesi Kutup Araştırmaları Uygulama ve Araştırma Merkezi koordinasyonunda ülkemizin Antarktika kıtasına yaptığı İlk Ulusal Antarktika Bilim Seferi 9 kişilik ekip ile başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu tarihten sonra her yıl düzenli olarak kıtaya bilimsel araştırmalar gerçekleştirilmiş ve her geçen gün araştırmaların kalitesi de artırılarak sürdürülmektedir.

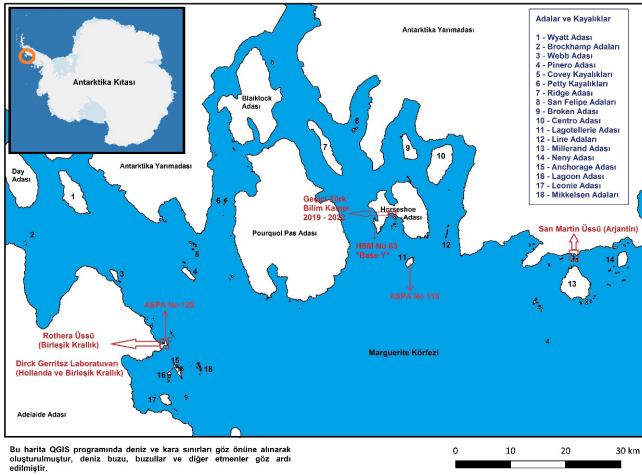
Kıtaya gerçekleştirilen ilk Ulusal Antarktika Bilim Seferi'nde 9 kişilik bilim ekibi (Şekil 1), Antarktika Yarımadası'nın batı sahillerinde 60 ila

68 derece güney enlemleri arasında kalan kısımları detaylıca incelemiş, bilimsel araştırmalar gerçekleştirmiş ve ileride olası Türk bilim üssü kurulabilecek yer olan Horseshoe Adası'nda bilimsel ölçümler gerçekleştirmiştir. 2019 yılında yayınlanan "Site selection of the Turkish Antarctic Research station using Analytic Hierarchy Process" isimli makalede Horseshoe Adası ve diğer olası üs noktalarının bilimsel açıdan karşılaştırılmalı analizi yayınlanmıştır [2]. Bu kapsamda en verimli bilimsel sonuçlar üretebilecek bölgenin, Antarktika Dairesi içerisinde yer alan Horseshoe Adası ve çevresi olduğu görülmüştür.

Şekil 2'de görüldüğü üzere Horseshoe Adası Antarktika Yarımadası'nın en güney lokasyonunda yer alan Marguerite Körfezi'nde yer almaktadır. Çevresinde irili ufaklı birçok adanın yanı sıra yaklaşık 50 kilometre çapında İngiltere, Arjantin ve Şili gibi ülkelerin bilim üsleri yer almaktadır [3]. Horseshoe Adası konumu ve yapısal özellikleri sayesinde üzerinde birçok yeni ve farklı bilim dallarında araştırmalar yapılabilmesine imkan sağlamaktadır.



Şekil 1. Horseshoe Adası'na ayak basan ilk Türk ekibi (Fotoğraf: Sinan Yirmibeşoğlu).



Şekil 2. Horseshoe Adası Konumu ve Çevresi ([4]’ten Türkçeleştirilmiştir).

Ulusal Kutup Bilim Stratejisi

2018-2022 yıllarını kapsayan ülkemizin ilk kutup araştırmaları stratejisi “Ulusal Kutup Bilim Programı” ismiyle ilgili bakanlıkça yayınlanmış, uygulanmış ve altı aylık dönemler şeklinde raporlanmıştır. Önümüzdeki dönemlerde Ulusal Kutup Bilim Programı ve Stratejileri planlanarak devam ettirilecektir. Günümüzde ülkemizin kutup araştırmaları TÜBİTAK MAM Kutup Araştırmaları Enstitüsü koordinasyonunda yürütülmektedir. 2019 yılının sonlarında kurulan Enstitü her iki kutup bölgesine de bilimsel seferler düzenlemenin yanısıra birçok eğitim ve farkındalık faaliyeti de gerçekleştirmektedir.

Ulusal Antarktika Bilim Seferleri, Antarktika Araştırmaları Bilimsel Komitesi (The Scientific Committee on Antarctic Research-SCAR) tarafından belirlenen dört ana alan doğrultusunda kabul edilen projelerle sürdürülmektedir. Her yıl yeni araştırmacılar TÜBİTAK Kutup 1001 isimli proje çağrısına başvurarak kutuplarda projelerini gerçekleştirebilmek adına birbirleriyle yarışmaktadır. Her yıl 15 civarında yer bilimlileri, fiziki bilimliler, canlı bilimlileri ve sosyal – beşeri bilimliler alanlarında birbirinden farklı ve çok disiplinli proje hakem değerlendirmesinden başarıyla geçerek desteklenmektedir.

Antarktika kıtası Çevre Koruma Protokolü ile özel bir koruma altına alınmış durumdadır. Ülkemizin iç hukukuna da uyarlanan bu anlaşma sayesinde kıta dünyanın en temiz kıtası olma yolunda hassasiyetini sürdürmektedir. Fakat yapılan ölçümler ve gözlemler sonucunda antropojenik etkinin kutuplara kadar

ulaşabildiği rahatlıkla görülmektedir.

Ulusal Kutup Bilim Seferlerinin yanı sıra ülkemiz ikili iş birliklerine oldukça önem vermektedir. Bu doğrultuda Antlaşma sistemindeki ülkeler ile MoU (Momerandum of Understanding) yapılarak hem bilim hem de bilim insanı değişimi yapılması sağlanmaktadır. Bu sayede her yıl ulusal olarak düzenlenen sefere yabancı bilim insanları davet edilirken diğer bilim üslerine de Türk bilim insanları gönderilmiş olmaktadır.

Horseshoe Adası Türk Bilim Kampı

Türk Bilim Kampı 2019 yılında 3 modüler binadan oluşacak şekilde Antarktika’da çevre koşullarına uygun olarak inşa edilmiştir (Şekil 3, [5]). Aynı dönemde ülkemizin kıtadaki ilk meteoroloji istasyonu da kurulmuştur [6]. Daha sonraki seferlerde ada üzerine 2 farklı GNSS istasyonu, 1 adet sismik istasyon da inşa edilmiştir. Ayrıca Dismal Adası’na da bir adet GNSS istasyonu kurulmuştur. Teknoloji kullanılarak insanın dayanamadığı dondurucu kutup sıcaklıklarında otomatik veri toplayan istasyonlar ile literatürdeki boşluklara oldukça büyük katkılar sunulmaktadır. İlerleyen yıllarda adada kurulması planlanan ve çevre raporu uluslararası olarak onaylanan Türk Bilim Üssü’nün kurulması ile de yapılabilecek bilimsel araştırmalar maksimum seviyeye yükseltilmiş olacaktır.



Şekil 3. Türk Bilim Kampı Drone Görüntüsü (Fotoğraf: Özgün Otkar).

Yerli ve milli ürünlerin de kıtada kullanılması hedefiyle ASELSAN tarafından üretilen saha telsizleri ekibin koordinasyonunu kolaylaştırmıştır. Kurulan bir tona yakın ağırlıktaki role telsiz sistemi ile de adada kör noktalarda bile iletişim sağlanmıştır. Genellikle yurtdışı kaynaklı olan cihazların elektronik sistemlerinin de yerleştirilmesi çalışmalarından biri olarak HAVELSAN'ın GNSS sistemi ve TÜBİTAK SAGE'nin ısı pili de kıtada test edilen diğer ürünler arasındadır.

Kutup lojistiği kapsamında her yıl kıtaya tonlarca ağırlıkta bilimsel ekipman, teknik ürün ve sefer malzemeleri taşınıp ülkemize geri getirilmektedir. Kutuplarda bilimsel çalışmaların en önemli ve en büyük parçası olan lojistik diğer ülkeleri hayran bırakacak şekilde başarıyla sürdürülmektedir. Bunun yanı sıra sefer rotası planlamasında her yıl güncel deniz buzu ve buz dağları da takip edilerek en uygun rota oluşturulmaktadır. Bu kapsamda Göktürk-2 ve RASAT gibi optik uydularımız ile kıtadan alınan görüntüler de bilime destek vermektedir.

Ülkemizin Antarktika'da gerçekleştirdiği bilimsel çalışmaların geniş özeti ve Horseshoe Adası'nın tarihi "Review of Scientific Research Conducted in Horseshoe Island Where Potential Place for Turkish Antarctic Base" isimli makalede detaylı bir şekilde incelenmiştir [4]. Horseshoe Adası, kısa sürede birçok bilimsel çalışmaya ev sahipliği yapması ve gelecekte de yeni çalışmalara imkan sağlayabilecek olması sebebiyle Türk Bilim Üssü noktası için doğru bir seçim olmuştur (Şekil 4).



Şekil 4. Ulusal Antarktika Bilim Seferi Yapıtaşları

Ülkemizin Kutup Bilimleri Kronolojisi

- 1513 Piri Reis Haritası
- 1995 Antarktika Antlaşmasına İmza
- 2015 İTÜ Kutup Araştırmaları Uyg-Ar Merkezi
- 2017 İlk Ulusal Antarktika Bilim Seferi
- 2017 Antarktika Antlaşması Çevre Koruma Protokolüne İmza
- 2018 Ulusal Kutup Bilim Programı
- 2019 İlk Ulusal Arktik Bilim Seferi
- 2019 TÜBİTAK MAM Kutup Araştırmaları Enstitüsü
- 2019 Türk Bilim Kampı
- 2020 Antarktika'ya Götürülen İlk Öğretmen
- 2020 EPB tam üyelik
- 2021 SCAR tam üyelik
- 2021 COMNAP tam üyelik
- 2023 Antarktika'ya Götürülen İlk Öğrenciler
- 2023 Arktik'e Götürülen İlk Öğrenci
- 2023 Ulusal Kutup Bilim Stratejisi

Kuzey Kutbu

Antarktika'nın yanı sıra ülkemiz Kuzey Kutbu'na da bilimsel önem vermektedir. Ulusal Arktik Bilim Seferleri 2019 yılında (Şekil 5) başlamış ve üçüncüsü başarıyla tamamlanmıştır. Kuzey Kutbu ile ilgili konular "Arktik Konseyi" tarafından yürütülmektedir. Bu konseydeki danışman ülkeler sadece okyanusa kıyısı olan 8 ülkeden (ABD, Danimarka, Finlandiya, İsveç, İzlanda, Kanada, Norveç, Rusya) oluşmaktadır. Bu ülkelerin değiştirilememesi sebebiyle Kuzey Kutbu'nda yapılan çalışmalar için 8 ülkeden biriyle iş birliği oluşturulması gerekmektedir. Kuzeye yapılan seferlerde bilim ekibimiz Norveç karasularından başlayarak Arktik Okyanusu'nda çeşitli bilimsel çalışmaları başarıyla tamamlamıştır. Gelecek yıllarda bilimsel ihtiyaçlar doğrultusunda Arktik Okyanusu'nun çeşitli bölgelerinde araştırmalar devam ettirilecektir.



Şekil 5. İlk Ulusal Arktik Bilim Seferi Ekibi (Fotoğraf: Sinan Yirmibeşoğlu).

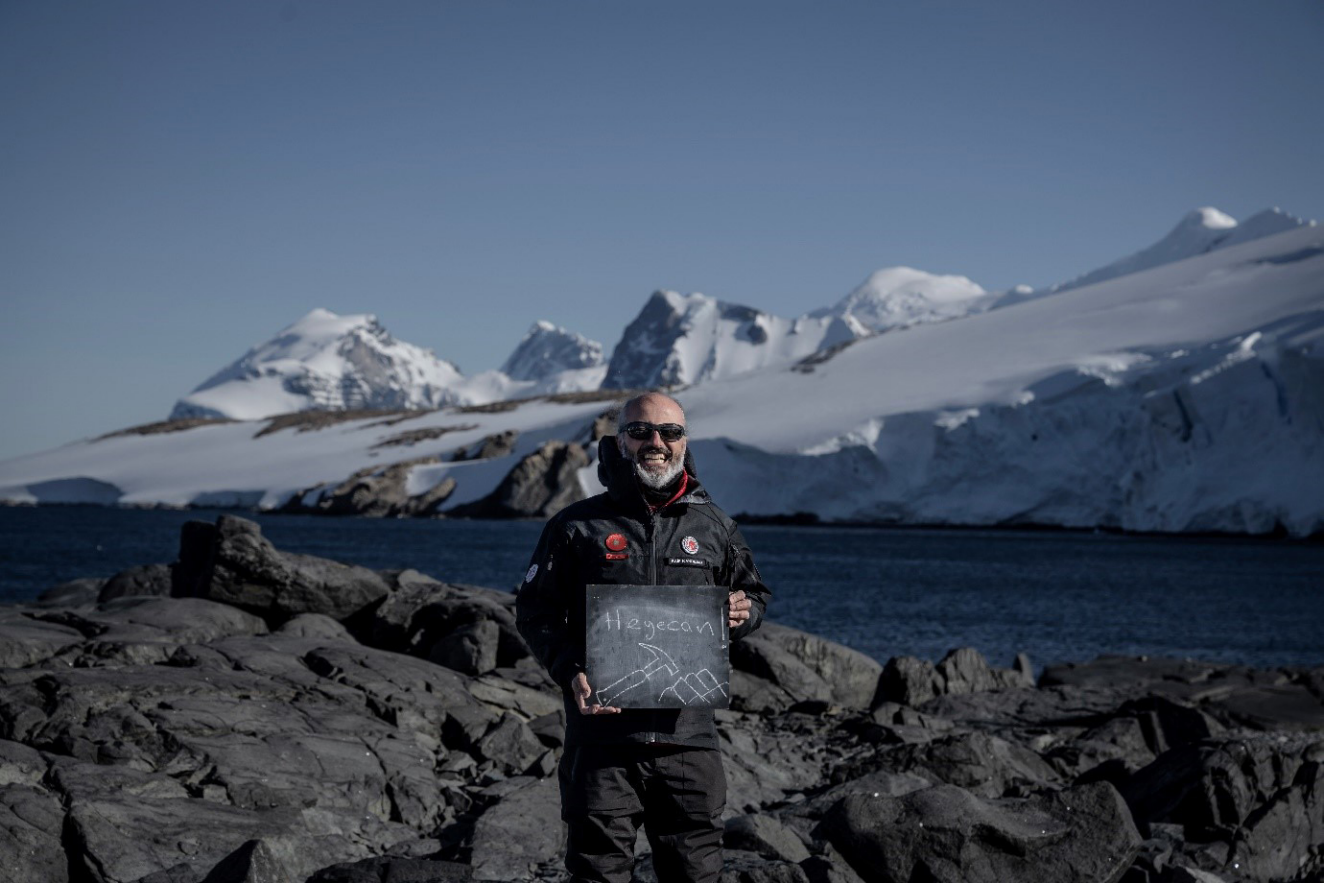
Sonuç

Ülkemizin kutup bilimleri çalışmaları, uzay araştırmaları gibi stratejik önemde olmasının yanı sıra gelecek yıllarda insanoğlunun yeni kaynak arayışları kapsamında daha da popüler bir hale gelmiş olacaktır. Günümüzde barışın ve bilimin hüküm sürdüğü Antarktika kıtası diğer kıtalar arasında ayrıcalıklı bir konumdadır. Kıtada yapılan bilimsel araştırmalar sayesinde gezegenimizin dünü, bugünü ve yarınına ışık tutulmaya devam edilmekte ve bu çalışmalar içerisinde Türk bilim insanları da önemli bir yer teşkil etmektedir. Antarktika Antlaşması Sistemi'nde, kapsamlı çevresel değerlendirme raporu uluslararası kabul edilen Türk Bilim İstasyonu'nun (TARS) önümüzdeki yıllarda kurulup faaliyete geçmesiyle birlikte bu çalışmalar büyük bir ivme kazanacaktır.

Gelecek dönemlerde yapılacak bilimsel araştırmalar, haberler, proje duyuruları gibi önemli bilgileri TÜBİTAK MAM Kutup Araştırmaları Enstitüsü'nün web sayfasından (<https://kare.mam.tubitak.gov.tr/>) takip edebilirsiniz.

Kaynakça

- [1] <https://data.aad.gov.au/aadc/gaz/scar/>. Karaali Rocks, İnan Peak, Tilav Cirque. SCAR Composite Gazetteer of Antarctica. Ağustos 2023
- [2] Yavaşoğlu, H. H., Karaman, H., Özsoy, B., Bilgi, S., Tutak, B., Gülnerman-Gengeç, A. G., Oktar, Ö. ve Yirmibeşoğlu, S. Site selection of the Turkish Antarctic Research station using Analytic Hierarchy Process. *Polar Science*, 22, 2019. doi.org/10.1016/j.polar.2019.07.003
- [3] COMNAP. Antarctic Station Catalogue, 2017. ISBN 978-0-473-40409-3.
- [4] Yirmibeşoğlu, S., Oktar, Ö. ve Özsoy, B. Review of Scientific Research Conducted in Horseshoe Island Where Potential Place for Turkish Antarctic Base. *International Journal of Environment and Geoinformatics (IJECEO)*, 9(4):011-023, 2021. doi.10.30897/ijegeo.1018913
- [5] <https://eies.ats.aq>. ATS EIES. Antarctic Projects. Ağustos 2023.
- [6] Özsoy, B., Yıkılmaz M., Biçer, Ç., Oktar, Ö. ve Yirmibeşoğlu, S. "Turkey's Scientific Expeditions in Antarctica and Meteorology Station Establishment" *Turkey's Meteorological Policies and Strategies from Past to Present*. 187-206, 2020. ISBN 978-605-342-548-9.



Bir Yer Bilimcinin Gözünden Antarktika: 7. Ulusal Antarktika Bilim Seferi (TAE-VII)

Antarktika, benim için “Heyecan” anlamına geliyordu. Cumhuriyetimizin 100. yılını kutladığımız 2023 yılı seferine katılmak bir bilim insanı olarak beni çok gururlandırmıştı. Bir yer bilimci olarak heyecanımı hiçbir zaman kaybetmedim. Yeni yerler ve yeni kayalar görmek, farklı coğrafyalardaki kayalara çekiç sallamak ve örnek almak çok heyecan vericiydi

Raif Kandemir

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Jeoloji
Mühendisliği Bölümü, 53100, Rize-Türkiye
raif.kandemir@erdogan.edu.tr

Giriş

Kutup bölgeleri dünyamız için özel, aynı zamanda önemli bölgelerdir. İklimi, coğrafyası, canlıları, kaynakları ile kendine has özellikler barındıran kutuplar, gezegenimizin doğal laboratuvarlarıdır. Dünyamızın geleceğini şekillendirecek olan “İklim değişikliği” kavramının izlendiği, zengin mineral ve maden yataklarını barındıran kutup bölgeleri, dünyanın bilimsel, teknolojik, iktisadi ve diplomatik açıdan en önemli odak noktalarıdır.

Türk bilim insanları Antarktika kıtasında 1967 yılından beri araştırmalar yapmaktadır. Arktik'teki ilk faaliyetlerin ise 1528'de Osmanlı döneminde

başladığı bilinmektedir. 1513 tarihli Piri Reis'in dünya haritasında, Antarktika'ya en yakın bölge olan ve Güney Amerika kıtasının en güneyinde yer alan Ateş Toprakları (Tierra del Fuego) resmedilmiştir. Döneminde bu bölgeye ait tek haritayı çizen Piri Reis 1528 tarihli dünya haritasında, Atlantik Okyanusu'nun kuzeyinde Grönland'ı ve Kanada'nın kuzey doğu kıyılarını da göstermiştir.

Türkiye'nin kutup çalışmaları TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi bünyesindeki Kutup Araştırmaları Enstitüsünde yürütülmektedir. Her yıl yeni araştırmacılar TÜBİTAK Kutup-1001 proje çağrısına başvurarak kutuplarda projelerini gerçekleştirebilmek için birbirleriyle yarışmaktadır. Türkiye, bugüne kadar, 2017'deki sefer dâhil Antarktika'ya 7, Arktik'e ise 3 bilimsel sefer düzenlemiştir. Bu seferlere Antarktika'ya 105 Türk, 14 yabancı, Arktik'e ise 19 Türk, 3 yabancı bilim insanı katılmıştır. Yer bilimleri alanında Antarktika'ya 25 Türk, 1 yabancı, 26 yer bilimci, Arktik'e ise 1 yer bilimci projeleriyle katılmıştır. Ayrıca, şimdiye kadar 6 kez düzenlenen Ulusal Kutup Bilimleri Çalıştay'ında Yer Bilimleri başlığı altında onlarca bildiri sunulmuştur.

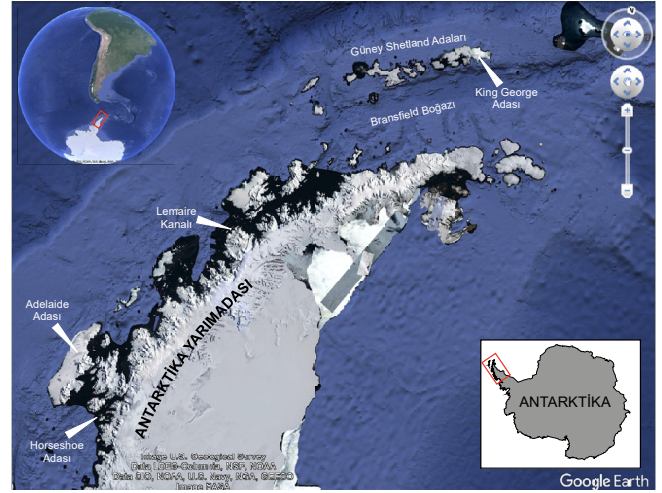
Antarktika, 1961 yılında yürürlüğe giren Antarktika Antlaşması ile barışa ve bilime adanmış, kimseye ait olmayan, giriş için vizenin gerekmediği, içerisinde ülke olmayan, 14.2 milyon km² yüz ölçümlü, %98'i buz örtüsü ile kaplı, dünyanın en kurak, en soğuk ve en rüzgarlı kıtasıdır. Antarktika, bu özellikleriyle tüm bilim dallarının odaklandığı, ancak ulaşım ve çalışma şartlarının oldukça zor olduğu bir kıtadır. Yer bilimleri açısından bakıldığında, Antarktika'daki kayaçların çok azı doğrudan çalışılmıştır. Bilim insanlarının ortak görüşü, Antarktika'daki buzulların altındaki jeoloji ve topoğrafyanın Mars'tan daha az bilindiği yönündedir. Yer kürenin hayati öneme sahip parçalarından birisi olan Antarktika kıtası, Dünya'nın geçmişi hakkında birçok bilgiyi saklamaktadır.

Horseshoe Adası'nın Jeolojisi

Antarktika Kıtası'nın %98'inden fazlası buzla kaplı olduğundan, jeolojisi ayrıntılı olarak bilinmemektedir. Bununla birlikte mevcut yüzleklerdeki araştırmalarla kıtanın jeolojik geçmişi araştırılmaktadır. Mesozoyik dönemin başlangıcında, günümüz Antarktika'sının büyük bir kısmı Gondwana süper

kıtasının merkezinde yer almaktaydı. Ancak Geç Triyas'ta süper kıtanın parçalanma sürecini izleyen jeolojik olaylar sonucunda ana kıtaya eklenen bloklarla Antarktika büyüyerek günümüzdeki görünümünü kazanmıştır. Antarktika kıtası, Transantarktik Sıradağları'nın ayırdığı doğu ve batı bloklardan oluşur. Victoria Toprakları ile Pensacola Dağları arasında uzanan Transantarktik Dağları jeolojik olarak kratonik Doğu Antarktika ile daha genç bir yapıya sahip Batı Antarktika'yı ayırmaktadır. Kratonik doğu bloğu Prekambriyen ve Kambriyen'de bir araya gelen Arkeen ve Proterozoyik parçaların bir araya gelmesiyle oluşmuştur [1]. Buna karşın Batı Antarktika, Antarktik Yarımadası, Thurston Adası, Ellsworth-Whitemore Dağları, Haag Nunataks ve Marie Byrd Toprakları'ndan oluşan beş bloğun bir araya gelmesiyle oluşmuştur [2].

Türkiye Cumhuriyeti, Antarktik Yarımadası'nın batısında, kutup dairesi içerisinde yer alan Horseshoe Adası'nı, Türkiye Antarktik Araştırmaları için üs yeri olarak seçmiştir [3] (Şekil 1 ve Şekil 2).



Şekil 1. Antarktika Yarımadası ve 7. Ulusal Antarktika Seferi (TAE-VII) güzergâhındaki önemli noktalar (Şekil Google Earth'ten üretilmiştir).



Şekil 2. Horseshoe Adası, Lystad Koyu, Geçici Türk Bilim Üssü

Horseshoe Adası, Antarktik Yarımadası'nın Gondwana'dan kopuşu ve Antarktika kıtasıyla çarpışarak birleşmesi sırasında oluşan kayaçların yüzeleildiği bir konumdadır. Horseshoe Adası'nın da içerisinde yer aldığı Batı Antarktika'nın jeolojisi Güney Amerika'da yer alan And Dağları'nın jeolojisine benzerlik sunmaktadır [4].

Horseshoe Adası'nın jeolojisi İngiliz Jeolog Matthews (1983) tarafından çalışılmıştır. Adanın en yaşlı kayaçları, Antarktik Yarımadası'nın en yaşlı kayaçları olan "Antarktik Yarımada Metamorfik Kompleksi"ne ait kayaçlardır [5]. Bu kayaçlar Antarktik Yarımadası'nın şimdiye kadar bulunan en yaşlı kayaçları olarak belirtilmiştir. Metamorfik Kompleks'e ait kayaçlar, adanın kuzey ucuna yakın kısımlarda heterojen kırmızı veya beyaz renkli granit "Yaşlı Plütonik Topluluk" olarak ifade edilen plütonik kayaçlar tarafından kesilmiştir [5]. Matthews (1983), dokanak ilişkilerine bakarak bu granitlerin yaşının Jura öncesi olduğunu önermiştir. Antarktik Yarımada'nın sınırlı alanlarında yüzeleyen bu plütonik kayaçların oluşumu ve yaşı hakkında literatürde herhangi bir bilgi yoktur. Birim yitim ilişkili "Antarktik Yarımada Volkanik Kompleksi"ne ait volkanitler ve volkano-sedimanter kayaçlar tarafından örtülür. Volkanitler, Gondwana süper kıtasının parçalanması sürecinde aktif olan Paleo-Pasifik Okyanusu'nun Antarktik Yarımada'nın altına doğru yittiği döneme aittir. Horseshoe Adası'nda And Dağları'nın oluşumu ile ilişkili "And Plütonik Topluluğu" olarak ifade edilen, gabro-diyorit-granitlerden

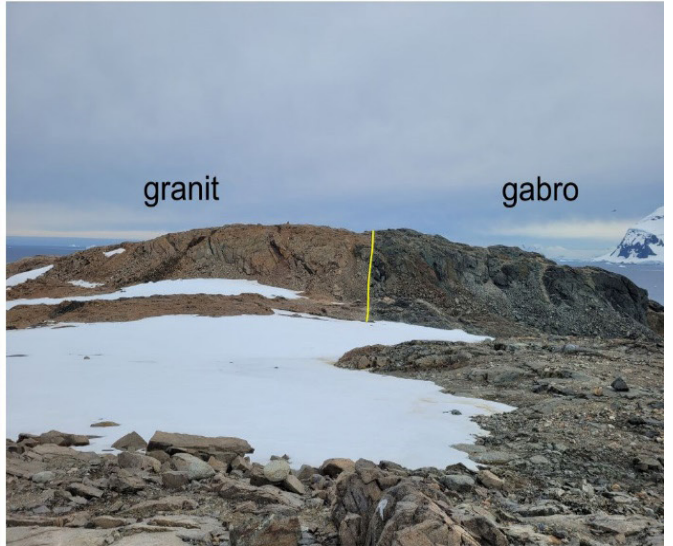
oluşan plütonik kayaçlar bulunmaktadır. Adada izlenen kayaçların bütünü çoğunlukla bazik, zaman zaman felsik daykılarla kesilmiştir (Şekil 3 ve Şekil 4). Ada ve çevresinin jeolojisi birçok çalışmaya konu olmasına rağmen kayaçların yaş ilişkileri-kimyasal bileşimleri, oluştukları jeotektonik ortam ilişkisi ve kayaçları oluşturan magmanın kökeni ile ilgili veriler oldukça eksik ve güncel değildir.

7. Ulusal Antarktika Bilim Seferi'ne (TAE-VII) Ait Gezi Notları

7. Ulusal Antarktika Bilim Seferi (TAE-VII) İstanbul'dan 30 Ocak 2023 tarihinde Türk Hava Yollarının İstanbul-Sao Paulo (Brezilya) uçuşuyla başladı. Türkiye'den yola çıkan ekip bu uçuştan sonra Sao Paulo – Santiago (Şili), Santiago – Punta Arenas (Şili) uçuşlarıyla Antarktika'nın Şili'den gidecekler için çıkış kapısı olan Punta Arenas'a varıldı. Punta Arenas'dan Antarktika'ya tarifeli olmayan uçaklarla veya gemi ile Drake Boğazı'nı geçerek ulaşılabilir. Drake Boğazı, deniz yolculuğu açısından dünyanın en zor deniz yolculuğu olarak ifade edilmektedir. Türk ekibi 1 Şubat 2023 tarihinde Punta Arenas'ta kendilerine eklenen yabancı bilim insanlarıyla birlikte 2 saatlik bir uçuş ile King George Teniente Rodolfo Marsh Martin Havalimanı'na ulaştı. King George, Antarktika'nın kuzeyinde yer alan Güney Shetland Takım Adaları'nın en büyüğüdür (Şekil 1). Ada üzerinde birçok ülkeye ait bilim üssü bulunmaktadır. Uçak adaya iner inmez zodyak botlarla birlikte Fildes Koyu'nda bekleyen gemimize intikal edildi. Betanzos adlı Şili bandıralı gemi 1973 yılında suya inmiş bir balina avcı gemisiydi. Betanzos, daha sonraki yıllarda elden geçirilerek, Development Antarctic Project (DAP) firması tarafından hizmet veren bir bilim gemisine çevrilmiştir. Betanzos 7. Ulusal Antarktika Bilim Seferi'nin ev sahipliğini yaptı (Şekil 5).



Şekil 3. Horseshoe Adası'nda yüzeyleyen bazı kayaçların sahadaki görünüşleri



Şekil 4. Horseshoe Adası'nda gözlenen bazı kayaçların sahadaki görünüşleri



Şekil 5. Betanzos (sağ) ve Sally Koyu'nda demirlemiş bir turist gemisi (sol).

7 Şubat 2023 tarihine kadar King George'da yer alan çeşitli ülkelerin bilim üsleri ziyaret edildi ve iş birlikleri konuşuldu. 7 Şubat sabahı Türkiye'den gelen deprem felaketinin haberleri tüm ekibin moralini bozdu ancak, ekip arkadaşlarımızın bazılarının deprem bölgesindeki yakınlarından alınan iyi haberler moralleri kısmen yükseltti. 7 Şubat 12.00'de Fildes Koyu'ndan demir alınarak Horseshoe Adası'na doğru seyire başlandı. Bransfield Boğazı geçilip Deception Adası'nın güneyinden devam edilerek (saat 22.41) ana karaya ulaşıldı ve daha güneye doğru adaların arasından yola devam edildi (Şekil 1). Bransfield Boğazı aslında Phoenix Levhası'nın güneydoğuda Antarktik Levhası'nın altına dalmasıyla gelişen ada yayı (Güney Shetland Adaları) arkasında açılan yay-ardı bir rift havzasıdır [6]. Deception Adası da bu rift içerisinde gelişmiş halen aktif bir volkandır. Bransfield'i geçip ana karaya yaklaştıkça olağanüstü bir manzaraya eşlik eden buz dağlarını ve zaman zaman Betanzos'a eşlik eden balina topluluklarını görme fırsatı yakalıyoruz (Şekil 6). 8 Şubat tarihinde Dünya'nın en güzel lokasyonlarından biri olan Lemaire Kanalı'na gelindi (Şekil 1 ve Şekil 7). Lemaire Kanalı, Antarktika açıklarında, ana karadaki Graham Toprakları'ndaki Kiev Yarımadası ile Booth Adası arasında bulunan bir boğazdır. Bazıları tarafından "Kodak Gap" lakaplı bu bölge, Antarktika'nın en gözde turistik lokasyonlarından biridir. 11 km (6,8 mil) uzunluğunda ve en dar noktasında yalnızca 1.600 metre genişliğinde olan buz dağlarıyla dolu bir geçittir ve kenarında dik kayalıklar bulunmaktadır [7] (Şekil 7).



Şekil 6. Bransfield Boğazı'nı geçerken gözlenen bazı buz dağlarının görünümü



Şekil 7. Lemaire Kanalı'nın güneyden çıkışı ağzı

Kanal girişinde hızı saatte 65 knota varan şiddetli rüzgar ve kanalı tıkayan buz dağları sebebiyle ilk denemede Lemaire Kanalı geçilemedi ve Betanzos geri dönerek traversler atmaya başladı. Sonraki gün tekrar denenecekti. 9 Şubat saat 18.00'den sonra Lemaire Kanalı'na girmeye başladık. Denizden fırlamış şekilde 75-80 derece eğimlere ulaşan kayalar yer yer buz örtüsüyle kaplıydı ve bizlere muhteşem bir manzara sunuyordu (Şekil 7). Kanal içindeki deniz okyanus sularına nispeten daha sakindi. Lemaire Kanalı'nı



Şekil 8. İngiliz "Y" istasyonu ve kano yapan İngiliz turistler.

geçtikten sonra daha güneye doğru seyrimize devam ettik. Adelaide Adası ile ana kara arasındaki boğazdan da geçtikten sonra Marguerite Körfezi'ne açıldık. 11 Şubat 2023 saat 22.30'da hedefimize ulaşıp Horseshoe Adası'nın doğusundaki Lystad Koyu'nda demir attık. Betanzos. artık gündüz araziye çıkıp çalıştığımız, akşam döndüğümüz evimiz olacaktı.

12 Şubat-24 Şubat tarihleri arasında Geçici Türk Bilim Üssü'nün bulunduğu Horseshoe Adası'nda saha çalışmalarımı gerçekleştirdim. 24 Şubat günü Horseshoe'nun kuzeyindeki Sally Koyu'nda yer alan İngiltere'nin "Y" istasyonunu ziyaret ettik. "Y" istasyonu 1950 yılında kurulmuş, 1955-1960 yılları arasında İngiliz bilim insanları tarafından kullanılmış bir istasyondur. İstasyon şu an turistler için müze olarak hizmet vermektedir (Şekil 8).

Horseshoe'da çalışmak için kaldığımız zamanlarda, sabah 09.30'da zodyak botlarla birlikte adanın farklı noktalarına çıktık. Akşam saat 18.00 veya daha geç saatlere kadar çalıştıktan sonra indiğimiz noktadan zodyak botlara binerek Betan-

zos'a döndük. 2023 yılı seferinde hava durumu çalışmak için çok güzel fırsatlar verdi ve Horseshoe'nun özellikle kuzeyi olmak üzere ulaşılabilecek her noktasına giderek örnekleme şansı yakaladım (Şekil 9). Antarktika'da örnekleme yaparken; sahadan alınacak her türlü numunenin belirtilen ön deklarasyonlara uygun, belirlenen izinler çerçevesinde, lojistik/taşıma maliyetini düşürecek şekilde planlanması hayati önemdedir. Kıtadan alınacak toprak ve kayaç örneklerinin toplanmasında da dikkatli olunmalıdır. Kayaç ve toprak örneklerinin mutlaka izin alınan lokasyondan ve belirtilen miktarda alınması gereklidir. Tüm örnekleme lokasyon, tarih, saat, miktar, tür vb. bilgiler alım sırasında kaydedilmelidir [8].

1 Mart 2023 günü 19.30'da başladığımız noktaya dönerek King George'daki Fildes Koyu'na demir atıldı. 2 Mart 2023 günü 20.40'ta King George'dan uçak ile Punta Arenas'a, Punta Arenas-Santiago-Sao Paulo-İstanbul dönüş rotası ile 4 Mart 2023 gece 22.55'te İstanbul'a varıldı.



Şekil 9. Horseshoe Adası'nda ulaşılan ve örnekleme yapılan bazı bölgelerin fotoğrafları

Son Söz

Antarktika'nın gelecekteki sürdürülebilirliğini tehdit edebilecek faaliyetlerden sadece dört tanesi: turizm, madencilik, balıkçılık ve biyo-araştırmalardır. Tüm bu faaliyetler, dikkatli bir şekilde kontrol edilmediği, yönetilmediği, yasaklanmadığı veya sınırlandırılmadığı takdirde Antarktika'ya ve çevresindeki okyanuslara zarar verme, değiştirme veya yok etme potansiyeline sahiptir [9]. Bu faaliyetler Antarktika Madrid Çevre Protokolü ile sınırlandırılmıştır. Fakat turizm faaliyetlerinin aşırı artışı TAE-VII'deki gözlemlerimizde de gözümüze çarptı. 1992-2020 yılları arasında Antarktika'yı ziyaret eden turist sayısı on kat artmış ve artmaya devam etmektedir [10]. Ayrıca, Antarktika'ya gelen ziyaretçi sayısı, 2020-21 COVID pandemisinden sonra da %40'tan fazla artmıştır [11]. Bunlar da turizmin olumsuz çevresel etkilerinin artacağı anlamına gelmektedir. Turizmin olumsuz etkileri; yolcu gemilerinin karbon salınımı, istilacı türlerin girişi, her türlü kirlilik, Antarktika'nın biyolojik çeşitliliğine yönelik tehditleri oluşturacaktır. Bu tehditler, Antarktika ekosistemindeki birçok türün hayatta kalmasını ve kıtanın küresel iklim düzenlemeye yardımcı olma yeteneğini riske atmaktadır [11].

Türkiye Cumhuriyeti'nin 2023-2035 Ulusal Kutup Bilim Stratejisi'ne baktığımızda beş farklı tematik araştırma alanını kapsamaktadır. Bunlar, Küresel İklim Değişikliği, Tehdit Altındaki Ekosistemler, Antropojenik Etkiler ve Sosyal Sistemler, Geçmişten Geleceğe Bakmak ve Uzaya Bakıştır. 2023-2035 Ulusal Kutup Bilim Stratejisi'nde "Geçmiş Geleceğin Anahtarıdır" ilkesi vurgulanmış ve bu ilke ışığında jeolojik kayıtların isabetli bir şekilde yorumlayabilme yeteneğinin oldukça önemli olduğu belirtilmiştir. Kutup bölgelerindeki jeolojik kayıtlar, dünyanın doğal ortam tarihi ve süreçlerinin dinamikleri hakkında çok boyutlu bilgiler sağlayabilmektedir. Özellikle Dünya'nın en geniş el değmemiş bölgesi olan Antarktika'nın jeolojisi hakkında daha ayrıntılı bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır. Kutup bölgelerinden elde edilecek her bir jeolojik kayıt, sadece gezegenimiz için değil, gezegenimizin içinde bulunduğu güneş sistemi hakkındaki bilgimizi artırmak için de önemli bir araç olacaktır [12].

Ülkemizin kutup bilimleri çalışmaları, uzay araştırmaları gibi stratejik önemde olmasının yanı sıra

gelecek yıllarda insanoğlunun yeni kaynak arayışları kapsamında daha da popüler bir hal alacaktır. Kutuplarda yapılacak bilimsel araştırmalarla gezegenimizin dünü, bugünü ve yarınını ışık tutulacaktır. Bu çalışmalar içerisinde Türk bilim insanları ve yer bilimciler önemli yer teşkil edecektir.

Teşekkür

Katıldığım 7. Ulusal Antarktika Bilim Seferi (TAE-VII) Cumhurbaşkanlığı himayesinde, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı uhdesinde ve TÜBİTAK-Marmara Araştırma Merkezi Kutup Araştırmaları ve Uygulama Merkezi koordinasyonunda gerçekleştirilmiştir. TAE-VII kapsamındaki çalışmalar 122Y192 kodlu TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmektedir. TAE-VII seferinde arazi çalışmalarında bana yardımcı olan Jeoloji Mühendisi Şevval YALÇINKAYA BAY'a ve metni okuyup destek veren Tuğçe ÇAYIRLI ve ERTURAÇ ailesine teşekkür ederim.

Kaynakça

- [1] Gürbüz, A. Antarktika'da yerbilimleri. MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, 29: 23-28, 2020.
- [2] Dalziel, I. W. D. ve Elliot, D. H. West Antarctica: problem child of Gondwanaland. *Tectonics*, 1, 3-19, 1982.
- [3] Şenel, M. ve Yavaşoğlu, H. H. Antarktika'da Araştırma İstasyonu Kurmak için En Uygun Yer Seçimi: Türkiye Örneği. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20, 015502, 72-82, 2020.
- [4] Stonehouse, B. *Encyclopedia of Antarctica and the Southern Oceans*. John Wiley and Sons. ISBN:978-0-471-98665-2, 2002.
- [5] Matthews, D. W. The geology of Horseshoe and Lagotellerie Islands, Marguerite Bay, Graham Land. *British Antarctic Survey Bulletin* 52, 125-154, 1983.
- [6] Lawver, L., Sloan, B., Barker, D., Ghidella, M., Von Herzen, R., Keller, R., Klinkhammer, G. ve Chin, C. Distributed, active extension in Bransfield basin Antarctic Peninsula: evidence from multibeam bathymetry. *GSA Today* 6, 1-6, 1996.
- [7] https://en.wikipedia.org/wiki/Lemaire_Channel. Kasım 2023
- [8] Yavaşoğlu, H. Bilim. Ulusal Kutup Bilim Seferleri Eğitim Kitabı (Editor: Özsoy, B.), Bölüm-II, 15-23, 2021.
- [9] <https://discoveringantarctica.org.uk/challenges/sustainability/future-of-antarctica/>. Kasım 2023
- [10] <https://www.iucn.org/resources/issues-brief/impacts-tourism-antarctica>. Kasım 2023
- [11] <https://www.weforum.org/agenda/2023/01/antarctica-ecosystems-ice-tourism-damage-environment/>. Kasım 2023
- [12] T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. Ulusal Kutup Bilim Stratejisi 2023-2035, 40 s, 2023.



Permafrost

İklim değişiminde zaman ayarlı bir tehdit

Yakın zamanda, iklim değişimi ile permafrost çözümlenmesi arasındaki etkileşimin, devletlerin ve politika yapıcı çevrelerin gündemlerinde kendine daha çok yer bulacağına da kuşku yok. Yerbilimciler ise permafrost çözümlenmesinin gezegenimiz açısından olası sonuçlarının neler olabileceğini jeolojik geçmişte meydana gelmiş ve canlılar açısından oldukça dramatik sonuçları olmuş pek çok olayın jeolojik kayıtlarından çıkarsayabiliyorlar.

PERMAFROST

İklim değişiminde zaman ayarlı bir tehdit

Alper Gürbüz

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik
Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü
agurbuz@nigde.edu.tr

Mustafa Şenkaya

Bursa Uludağ Üniversitesi, İnegöl Meslek
Yüksekokulu, İnşaat Bölümü

Gezegenimizin, kutup bölgeleri başta olmak üzere permafrost barındıran alanlarında küresel ısınmanın neticesinde meydana gelen hızlı değişiklikler, önemli küresel yansımaları olan oldukça karmaşık jeolojik süreçleri de tetikliyor. Barındırdığı sera gazları ve dahası günümüz dünyasında artık yaşamını sürdürmeyen birçok 'donmuş' mikroorganizmadan ötürü, çözülen büyük miktarlardaki permafrostun toplumsal bir tehdide dönüşme potansiyeli ise çeşitli disiplinlerden bilim insanlarının üzerinde hem fikir olduğu konuların başında geliyor. Permafrost konusuna özellikle son yıllarda artan bilimsel ilginin

temelinde sosyal ve ekolojik açılardan taşıdığı bu önem yatmakta. Yakın zamanda, iklim değişimi ile permafrost çözülmesi arasındaki etkileşimin, devletlerin ve politika yapıcı çevrelerin gündemlerinde kendine daha çok yer bulacağına da kuşku yok. Yerbilimciler ise permafrost çözülmesinin gezegenimiz açısından olası sonuçlarının neler olabileceğini jeolojik geçmişte meydana gelmiş ve canlılar açısından oldukça dramatik sonuçları olmuş pek çok olayın jeolojik kayıtlarından çıkarılabiliyorlar.

Permafrost nedir?

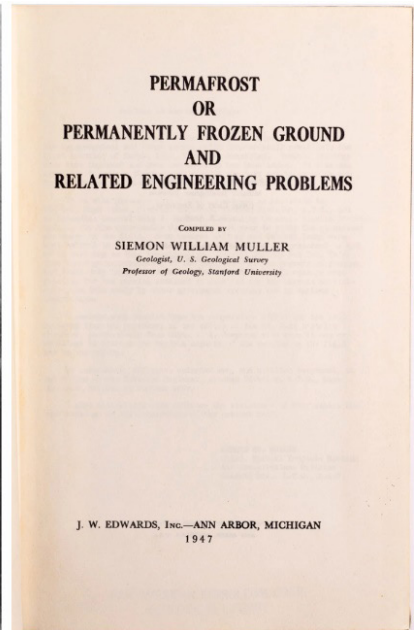
Permafrost veya daimi donmuş zemin birbirini izleyen en az iki yıl boyunca donmuş halde kalabilen toprak, sediman veya kaya zeminleri ifade ederler. Ancak, gezegenimizdeki oluşumlarının çoğu bundan çok daha eskidir ve eski buzullaşma dönemlerinden süregelirler [1]. 'Daimi donmuş zemin' olarak uzun zamandır anılan bu ortamlar için bu ifadenin fazla uzun olduğu belirtilerek yerine daha kolay bir kullanımı olacağı gerekçeyle 'permafrost' kelimesi ilk kez Siemon William Muller (1900-1970; Şekil 1) tarafından önerilmiş ve kullanılmıştır [2, 3]. Stanford Üniversitesi'nde jeoloji profesörü olan Muller'in asıl uzmanlık alanı Triyas paleontolojisi ve stratigrafisi olmasına karşın permafrost konusundaki çalışmalarıyla da tanınmaktadır. İkinci Dünya Savaşı yıllarında US-

GS'nin Askeri Jeoloji Birimi bünyesinde çalıştığı sıralarda Alaska'nın donmuş arazilerinde askeri mühendislik açısından ciddi problemlere sebep olan permafrost üzerine gözlemler ve araştırmalar yapmış ve bu konu kapsamında önemli katkılar sağlamıştır.

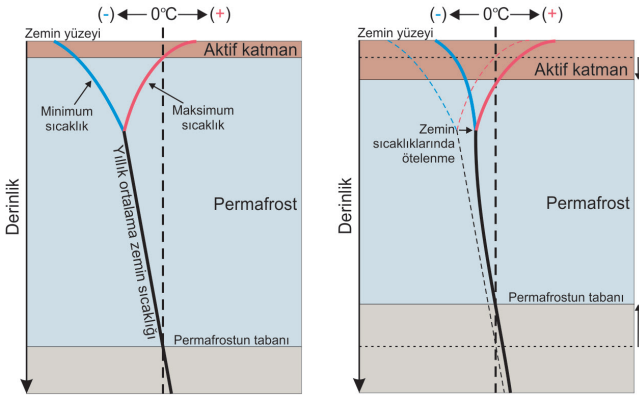
Esas itibariyle permafrostun bünyesinde donuk olduğunu yansıtabilecek nem/buz olmasına gerek yoktur. Sıcaklığa dayalı bir tanımı olmasından ötürü 0° C ve altında sıcaklığa sahip derinlikte bir zemin olması bu ortam için yeterlidir. Permafrostun yeryüzünden itibaren mevsimsel olarak çözülen maksimum derinliğine aktif katman denir (Şekil 2). Aktif katman donma-çözülme süreçleri içerisindeki dinamiğinden dolayı bu ismi almıştır. Bazen permafrost ile aktif katman arasında, bazen de permafrost içinde gözlenen donmamış zemin zonları da mevcuttur. Talik ismi verilen bu kısımlar, permafrost içindeki yerel bir farklılıktan (termal, hidrojeolojik vb.) kaynaklı olarak uzun süreli donmaktan korunabilmiş zemin parçasıdır [4].

Permafrost dağılımı

Güncel tahminlere göre permafrost barındıran araziler Kuzey Yarımküre'nin %15 ila %24'lük bir kesimini kaplamaktadır [5, 6]. Permafrost kalınlığı ise birkaç desimetre ile 1,5 kilometre arasında değişmektedir. Kuzey Yarımküre'de özellik-



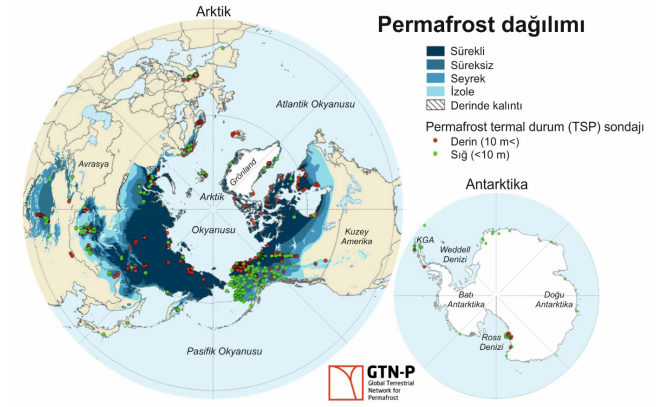
Şekil 1. Amerikalı jeolog Siemon William Muller (1900-1970), ortada Muller tahminen 1944 yılında permafrost yüzleği önünde ve sağda Muller'in ilk olarak 1943 yılında basılan permafrost ve ilişkili mühendislik problemleri raporunun 1947'deki kitap baskısı.



Şekil 2. Permafrost boyunca şematik dikey sıcaklık profili (solda) ve zemin ısınması neticesinde permafrostun zemin sıcaklıklarında meydana gelen ötelenme (sağda) (Kanada Jeolojik Araştırma Servisi'nden Scott Dallimore'un şeklinden değiştirilerek alınmıştır).

le Sibiryaya, Alaska ve Kanada gibi coğrafyalarda geniş yayılım göstermekle beraber, Grönland, Kuzey Avrupa ve Tibet Platosu ile Güney Yarım Küre'de de Antarktika yine permafrost olan diğer başlıca bölgeleri temsil etmektedir (Şekil 3). Kalın buz örtüleri altındaki araziler permafrost olarak kabul edilmediğinden, Antarktika ve Grönland gibi tamamına yakını buzla örtülü coğrafyalarda permafrost araziler kara alanlarının kenar kesimlerinde tanımlanırlar. Ülkemizin önemli dağlık alanlarında da olduğu gibi [7] yerel olarak dünyanın farklı bölgelerindeki birçok dağ kuşağının periglasiyal alanların permafrost oluşukları mevcuttur. Dahası son buzul döneminde deniz seviyesinin üzerindeyken gelişmiş permafrost arazilerine, günümüzde deniz altında kalan Arktik bölgesi kıta sahanlığında da rastlanmaktadır. Öte taraftan, bu oluşuklar yalnızca gezegenimize özgü değildir. Mars'ın hemen hemen tüm enlemlerinde permafrost olabileceği değerlendirilmektedir [8].

Bilim insanları permafrost arazilerini haritalamaya yirminci yüzyılın ortasına doğru başlamış olsalar da, Uluslararası Permafrost Derneği, yaklaşık 30 yıl önce, Kuzey Yarım Küre'deki permafrost dağılımının ve özelliklerinin tek ve bütün bir haritasına ihtiyaç olduğunu belirterek, sürekli, süreksiz, seyrek, izole (tekil) yamalar ve deniz altı permafrost şeklinde sınıflandırılarak haritalanmalarını önermiştir [9] (Şekil 3). Bu sınıflandırmadaki genel yaklaşım; permafrostun arazideki tahmini coğrafi sürekliliğine dayalı olarak bölgelendirme



Şekil 3. Arktik bölgesi ve Tibet Platosu (solda) ile Antarktika'da (sağda) permafrost dağılımı ve termal durumlarının anlaşılması için açılan sondaj lokasyonlarını gösterir haritalar (Permafrost için Küresel Karasal Ağ (GTN-P)).

yapmaktır. İlgili bölgenin altındaki daimi donmuş zemin oranı %90'ın üzerindeyse sürekli, %50 ila 90 arasındaysa süreksiz, %10 ila 50 arasındaysa seyrek permafrost ve %10'un altındaysa da izole yamalar olarak sınıflandırılmaktadır [10].

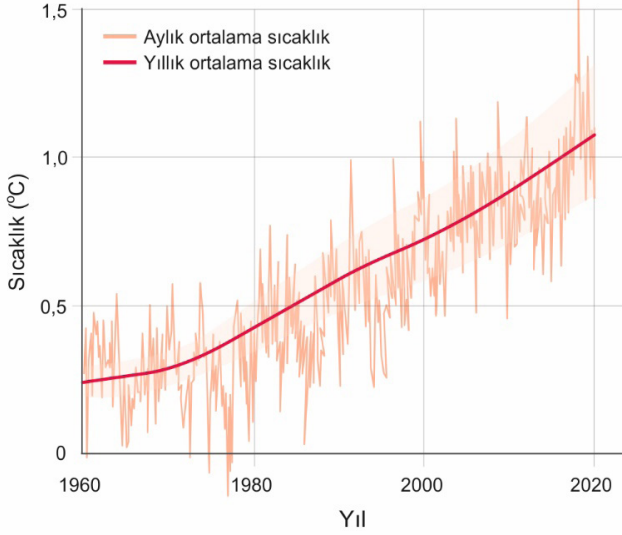
Gerek Kuzey gerekse de Güney Yarım Küre'de yapılan ve sayıları her geçen gün artan permafrost izleme çalışmaları, permafrost arazilerin üstünü örten aktif katman kalınlıklarının hızla arttığına, yani altlarındaki permafrostun çözülmesine işaret etmekte, bu da yerküre üzerindeki dağılımlarını ciddi manada daraltmaktadır.

İklim değişimi ve permafrostun etkileşimi

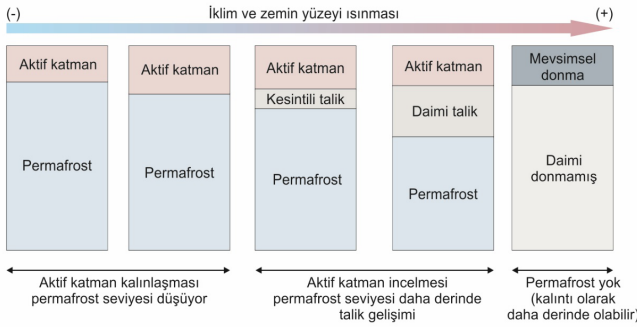
Son yapılan çalışmalara göre, sanayi devri öncesi seviyelerin üzerinde 1°C'lik bir küresel sıcaklık artışı, neredeyse 4.000.000 km² olan Hindistan'ın büyüklüğünden biraz daha büyük bir alanda permafrost kaybına neden olurken, 2°C'lik bir artış ise gezegenimizdeki permafrostun %40'unun kaybına neden olacaktır [11]. Geçtiğimiz on yılda yüzey sıcaklıklarının ortalama aylık değeri 1,50C'yi geçmiştir (Şekil 4) [12]. Bu yazının hazırlandığı 2023 yılının Temmuz ayı gezegenimiz üzerinde aletsel olarak kaydedilen en yüksek Temmuz ayı sıcaklık rekorunu kırarken, geçtiğimiz 2022 yılı, kayıtların başladığı 1880'den bu yana tarihin en yüksek sıcaklıklarından biriyle kapanmıştı. Dünyanın ortalama sıcaklığındaki artış, yükselen deniz seviyesinden aşırı hava olaylarının artması kadar birçok alanda şiddetli şekilde karşımı-

za çıkarken yeryüzünü ısıtıyor ve permafrostun üst katmanını da hızla eritiyor (Şekil 5). Diğer taraftan bu rekor seviyedeki yüksek sıcaklıklar, orman yangınlarının artması gibi başka yollarla da Arktik bölgelerinde permafrost çözülmesini daha da hızlandırmakta [13].

Görelî küresel ısınma (1850-1900 dönemine göre)



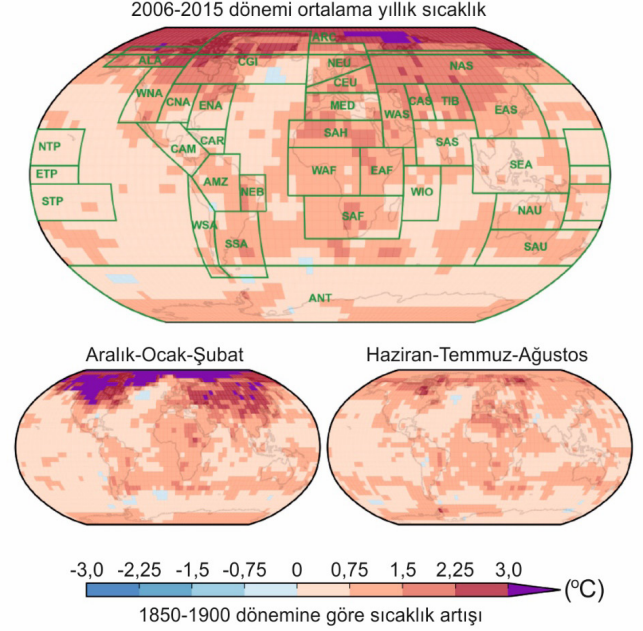
Şekil 4. 1950-2020 yılları arası gözlemlenen aylık (turuncu çizgi) ve yıllık (kırmızı çizgi) küresel ortalama yüzey sıcaklıklarının 1850-1900 dönemine göre değişimi ([12]'den değiştirilerek alınmıştır).



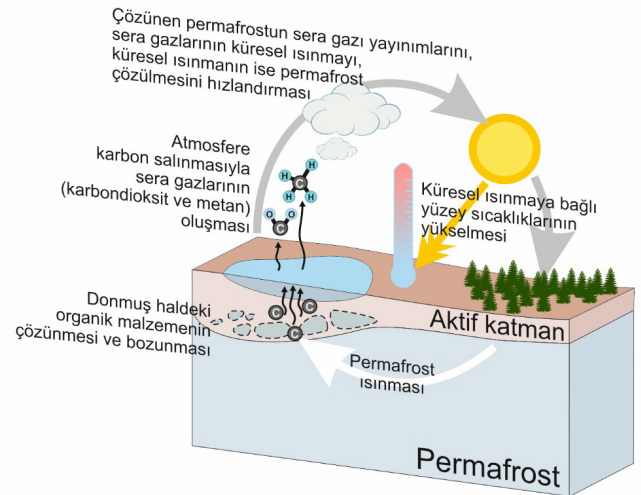
Şekil 5. İklim ve zemin ısınmasından ötürü permafrostun çözülmeye uğrayarak üst kesimlerinde aktif katmanın mevsimsel olarak donmuş bir katmana, onun altında ise talik oluşumlarına dönüşmesi ([14]'ten değiştirilerek çizilmiştir). Üst kesimlerde bu şekilde bir değişim olsa da daha derinlerde permafrost kalıntı olarak varlığını sürdürebilir.

Permafrost'un en geniş yayılım gösterdiği Arktik bölgesinde donmuş zemin barındıran araziler, gezegenimizdeki en büyük karasal karbon rezervuarları arasındadır ve Kuzey Yarım Küre'de yalnızca 3 m derinliğe kadar bile yaklaşık 1100 pe-

tagram karbon içerdiği tahmin edilmektedir [15]. Gerek saha çalışmaları [örn. 16, 17] gerekse de modelleme çalışmalarından [örn. 18-20] elde edilen ortak bulgular (Şekil 6), gezegenimiz ısınırken meydana gelen permafrost çözülmesinin hem CO₂ hem de CH₄ salarak küresel ısınmayı artıracığı konusunda hemfikir (Şekil 7) [12].



Şekil 6. Küresel ısınmasının mekânsal ve mevsimsel modeli ([12]'den değiştirilerek alınmıştır). Yıllık ortalama (üstte), Aralık, Ocak ve Şubat ortalamaları (sol altta) ve Haziran, Temmuz ve Ağustos (sağ altta) için 1850-1900'e göre 2006-2015 yılları arası sıcaklık dağılımları.

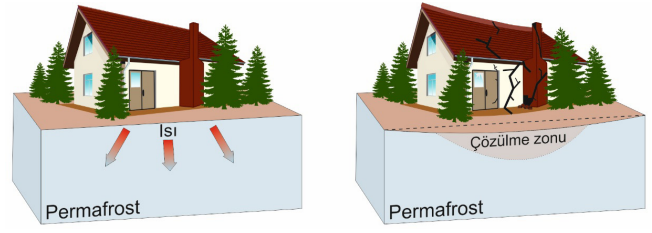


Şekil 7. Permafrost çözülmesi ve küresel ısınma arasındaki geri besleme döngüsü (Birleşmiş Milletler Çevre Programı verilerine göre Woods Hole Araştırma Merkezi tarafından hazırlanan şekilden değiştirilerek çizilmiştir).

Endişelenmeli miyiz?

Kısa yanıt; kesinlikle! Çünkü insan kaynaklı iklim değişikliği nedeniyle gezegenimizdeki permafrost hızla çözülüyor, bu da yukarıda bahsedilen küresel ısınmaya yaptığı geri beslemenin yanı sıra mühendislik yapıları ve ekosistem üzerinde daha şimdiden gözlemleyebildiğimiz doğrudan etkilere de sahip.

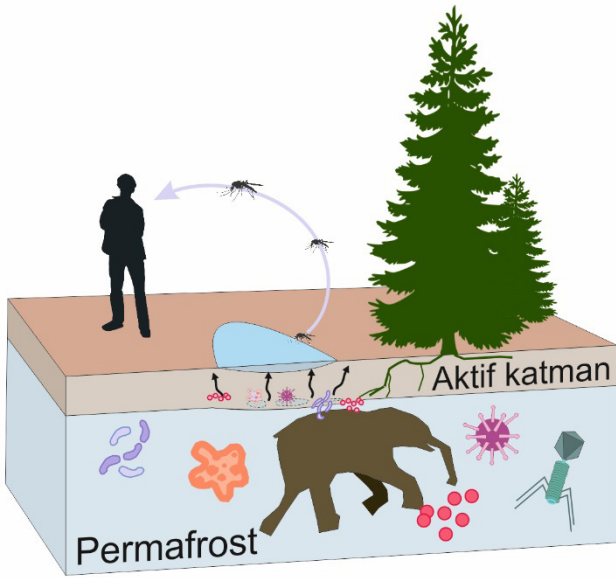
Yukarıda da değinildiği gibi jeolog Siemon Muller'in permafrost kelimesini önermesini sağlayan dönemde Alaska bölgesi başta olmak üzere Arktik'te askeri amaçlı üst ve altyapıların permafrost varlığından ötürü karşılaştığı mühendislik problemlerin anlaşılması amaçlanıyordu. İkinci Dünya Savaşı dönemine denk gelen bu süreç, aslında bu bölgedeki siyasi ve askeri çekişmenin bir neticesi olarak gelişmişti. Gerek yerleşim, gerekse de enerji sağlama amaçlı hızla artan hareketlilik ise bu soğuk bölgenin kendine has özelliklerini bilmeyenler açısından ciddi düzeyde can sıkıcı olabilmekteydi. Hâlbuki Arktik bölgesinde binlerce yıldır yaşam süren yerli insan toplulukları, asgari beklentileri ve geleneksel yöntemleri sayesinde permafrost bölgelerinde çok ciddi bir problemle karşılaşmadan yaşamlarını sürdürebiliyorlardı. Günümüzde Arktik bölgesinde enerji üretim ve iletim hatları başta olmak üzere sivil ve askeri amaçlı birçok mühendislik yapısı mevcut ve yapılmaya da devam etmektedir. Bu yapıların üzerinde buldukları zeminde yaymakta oldukları ısı ise altta bulunan permafrostun çözülmesine ve inşa edildikleri zeminin duraylılığının bozulmasına sebep olmaktadır (Şekil 8). Nihayetinde, zorlu coğrafi koşulları itibariyle zaten maliyeti yüksek olan bu mühendislik yapıları, büyük ölçüde permafrost arazilerde doğru tekniklerle yapılmadığında kendi sebep oldukları zemin duraysızlıkları neticesinde yıkılmaya varan zararlar görebilmektedir [21]. Bu yapılarda ve çevrelerinde yaşamını sürdüren insanlar açısından ciddi tehditler oluşturabilen bu yerel olumsuzluklarla baş etmek ise geliştirilen doğru mühendislik yaklaşımlarıyla büyük ölçüde mümkün olabilmektedir. Ancak aynı iyimserlikte bir bakış, çözülmekte olan permafrost arazilerin bünyelerinde barındırdıkları donmuş haldeki eski mikroorganizmaların günümüz dünyasına salınmasının sebep olabileceği sorunlar için pek mümkün görülmemektedir.



Şekil 8. Permafrost arazilerinde yaşam alanlarının yaymış olduğu ısı, donmuş zeminin çözülmesine ve duraylılığında bozulmaya neden olmakta ve yapıların ciddi hasarlar almasıyla, hatta çökmesiyle sonuçlanmaktadır.

Tahminlere göre permafrost bünyesinde atmosferin içerdiğinin iki katı kadar (~1500 gigaton) karbon depolanmış haldedir [17, 22]. En eski olanının yaklaşık 700000 yıl yaşında olduğu bilinen donmuş topraklardaki bu karbonun kaynağını ise bünyelerindeki organik maddeler oluşturmaktadır [23]. Permafrost çözülmesinin insan sağlığı ve çevre üzerindeki etkilerini karmaşıklaştıran belki de en önemli bilinmezi bu organik maddelerle ilişkilidir. Permafrost, çoğu canlanma potansiyeline sahip ve günümüz dünyasında bilinmedikleri için çoğunlukla karakterize edilmemiş mikroorganizmaları ve virüsleri barındıran adeta bir zaman kapsülüdür (Şekil 9). Oldukça eski zamanlarda yaşamış bu mikroorganizmalarla ilgili oldukça sınırlı olan bilgimiz göz önüne alındığında, bunların günümüz dünyasında yaşam sürdüren insanlar, hayvanlar ve bitkiler için ne düzeyde risk taşıdığı büyük bir problem olarak önümüzde duruyor [24-27]. Konunun endişe verici karmaşıklığı birçok bilim kurgu öyküsüne ve filmine senaryo olup okurlarını ve izleyenlerini heyecanlandırırken, bilim insanları içinde büyük bir merak unsuru olarak özellikle son dönemde önemi dile getiriliyor. Bu yönde yapılan bilimsel çalışmaların sayısı ise her geçen gün artıyor ve elde edilen bulgular medya organlarıncaya heyecan oluşturan başlıklarla halkın da dikkatine sunuluyor. On binlerce veya yüzbinlerce yıl önce yaşamış ve günümüz dünyasında var olmayan bir çiçekli bitkinin tekrar çimlendirilebilmesi veya kürklü bir mamuta dokunma olasılığı kamuoyunda olumlu yönde bir heyecan oluştururken, bir patojen ise çok daha büyük ölçüde bir endişe yaratabiliyor. Etkileri daha henüz azalmış olan Covid 19 pan-

demisinin gösterdiği üzere, bilinmeyen bir virüs tüm insanlığı doğrudan ve dolaylı olarak oldukça sıkıntılı süreçlerle karşı karşıya bırakabiliyor. İçerisinde tahmin dahi edemeyeceğimiz sayıda patojen barındıran permafrostun çözülme sürecinin, gelecekte insanlık için bu yönüyle de ne gibi sağlık ve çevre problemleri oluşturabileceği üzerinde daha yoğun çalışmalar yapılması ve bilinmeyenlerin mümkün olduğunca en aza indirilmeye çalışılması oldukça önemli. Öte taraftan konunun bu boyutu, kapsamı itibarıyla bilim insanlarının yanı sıra toplum ve politikacılar tarafından da acilen ele alınmasında ciddi bir önceliği hak ediyor. Sahip oldukları birçok kritik önemdeki bilinmeziyle permafrost çözülmesi sürecinin gezegenimiz ve üzerindeki canlılara etkisinin neler olabileceğini tahmin etmek çok kolay olmasa da, jeolojik kayıtlar bu gibi karmaşık süreçler hakkında büyük resmi görebilmemizi sağlayabilirler.

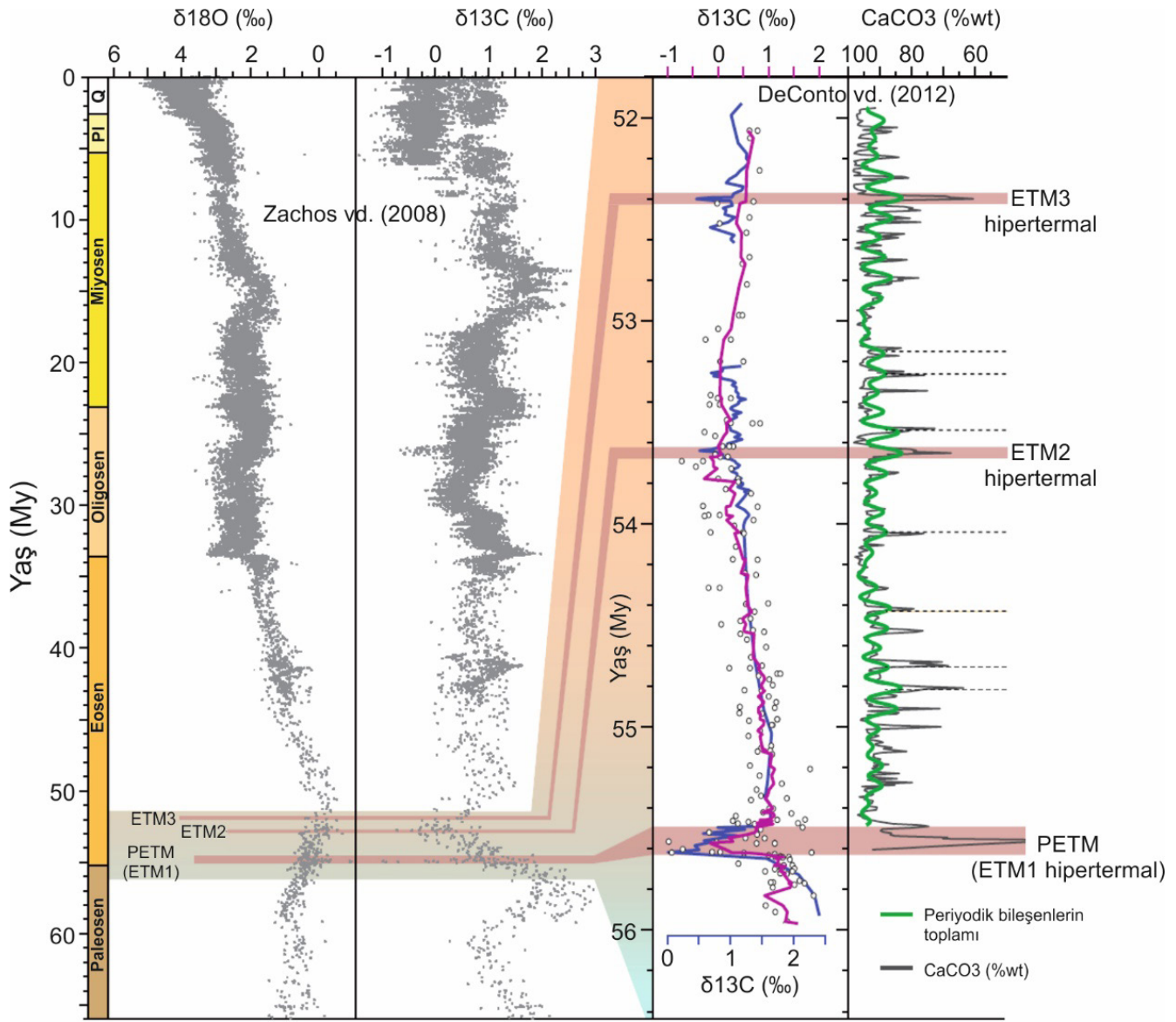


Şekil 9. Permafrost çözülmesiyle potansiyel patojenlerin ortaya çıkışı ve insan ve çevreye ulaşması (Wu vd. 2022'den esinlenerek çizilmiştir).

Yer bilimcilerin çokça telaffuz ettiği, gezegenimizin jeolojik geçmişinde meydana gelmiş ancak her biri günümüz dünyasında daha sürdürülebilir koşullarda yaşayabilmemiz için kendi içerisinde çıkarılması gereken birçok ders barındıran dramatik olaylardan biri de 56 milyon yıl önce meydana gelmiş olan Paleosen-Eosen Termal Maksimum olayı ve izleyen dönemde meydana gelen hipertermal olaylardır (Şekil 10). Ortalama yüzey sıcaklığının günümüze nazaran yaklaşık

5°C daha fazla olduğu bu dönem, gezegenimizin iklim dinamiklerini anlamak için elimizdeki en iyi analoglardan biri olarak değerlendirilmektedir [28]. Atmosfere büyük miktarda karbon girişinin meydana geldiği, okyanus asitlenmesi ve birkaç bin yıl gibi jeolojik olarak oldukça kısa bir zaman içinde küresel sıcaklıkta meydana gelen 5°C'lik bir artış bu olaya kaynaklık eden mekanizma(-lar) üzerine hararetli tartışmalara sebep olmaktadır. Küresel çapta 'çok sıcak' iklimsel koşullara sebep olan Paleosen-Eosen Termal Maksimum olayıyla ilişkili hipertermal olaylar için en önemli şüphelilerden biri de permafrost çözülmesidir. Paleosen-Eosen Termal Maksimum olayının esas kaynağı olarak daha çok destek gören Dünya'nın yörüngesindeki değişikliklerin, Arktik ve Antarktika bölgelerindeki sıcaklıkların yükselmesine neden olan ilk tetikleyici olsa da sonrasında meydana gelen hipertermal olaylara bu bölgelerdeki karasal permafrostun çözülmesinin, topraktaki organik karbonun ayrışmasının ve bir "sera" mekanizmasının kaynaklık edebileceği yapılan modelleme çalışmalarıyla gösterilmiştir [28]. Kısacası, günümüz dünyasında gözlemleyebildiğimiz küresel ısınma ve permafrost çözülmesi arasındaki geri besleme döngüsü, yerkürenin uzun jeolojik geçmişinde de bir, belki de birden çok kez canlılık üzerinde dramatik etkilere sebep olmuş olabilir.

Günümüzde ise geçtiğimiz yüzyıl içerisindeki insan kaynaklı emisyonlar nedeniyle zaten çok yüksek bir küresel ısınma oranına sahibiz. Bilim insanlarının geleceğe dönük endişe veren uyarılarından biri, bahsi geçen bu küresel ısınma sürecinin permafrost çözülme süreçlerini geri dönülemez bir düzeye getirip, salınacak sera gazlarıyla küresel ısınmanın hızını katlayarak artırmasına ve yeni hipertermal olaylara sebep olabileceğidir. Bugün atmosfere salınan doğrudan insan kaynaklı emisyonları azaltsak bile permafrostun çözülmeye devam edeceği tahmin ediliyor [29]. Ancak zaman ayarlı bu tehdide karşı, doğrudan insan kaynaklı emisyonları azaltmaya yönelik çabalarımızı hızla artırıp, çözülecek permafrostun miktarını kontrol etmeye çalışmak [22, 30] şu an için elimizdeki en makul yaklaşım gibi duruyor.



Şekil 10. [31]'e göre Senozoyik'te bentik oksijen ve karbon izotop değerleri (solda, sırasıyla birinci ve ikinci sütunlar) erken Eosen İklimsel Optimumu'nda doruğa ulaşan geç Paleosen-erken Eosen dereceli ısınma eğilimini ve hipertermal olayların (ETM1-3) konumlarını gösterir. Sağdaki sırasıyla iki sütun ise [28]'e göre Contessa Yolu kesitinde (orta İtalya) karbon izotopu (mavi çizgi Contessa Yolu'daki istifinin, pembe çizgi ise bir önceki sütündeki [31]'e göre karbon izotop eğrisini göstermekte) ve son sütunda CaCO₃ kayıtlarının yansıttığı erken Eosen hipertermal olayları. Paleosen-Eosen Termal Maksimum olayını izleyen hipertermal olayların gezegenimizin yörüngesindeki sapmalarla bağlantılı olarak permafrost çözülmesinin karbon döngüsünü geri beslemesiyle meydana geldikleri önerilmektedir [28]. Şekil [28]'den değiştirilerek alınmıştır.

Kaynakça

- [1] van Huissteden, J. Thawing permafrost (Vol. 1143). Springer International Publishing, 2020.
- [2] Muller, S. W. Permafrost or permanently frozen ground, and related problems: U.S. Engineers Office, Strategic ling. Study Spec. Rept. 62, 136 s., 1943.
- [3] Muller, S. W. Permafrost; or, permanently frozen ground, and related engineering problems: Ann Arbor, Mich., J. W. Edwards, 231 s., 1947.
- [4] Çalışkan, O. Permafrost ve Periglasyal Jeomorfoloji, Ankara Üniversitesi Yayınları, 437, Ankara, 2014.
- [5] Dobinski, W. Permafrost. Earth Sci. Rev. 108, 158–169, 2011.
- [6] Obu, J. How much of the earth's surface is underlain by permafrost? J. Geophys. Res. Earth Surf. 126, e2021JF006123, 2021.
- [7] Oliva, M., Žebre, M., Guglielmin, M., Hughes, P. D., Çiner, A., Vieira, G., ... ve Yıldırım, C. Permafrost conditions in the Mediterranean region since the Last Glaciation. Earth-Science Reviews, 185, 397-436, 2018.
- [8] Anderson, D. M. Subsurface ice and permafrost on

- Mars. In *Ices in the Solar System*, 565-581. Dordrecht: Springer Netherlands, 1985.
- [9] <https://nsidc.org/learn/parts-cryosphere/frozen-ground-permafrost#anchor-1>. NSIDC. Frozen Ground and Permafrost. National Snow and Ice Data Center. Ağustos.2023.
- [10] Heginbottom, J. A., Brown, J., Melnikov, E. S. ve Ferrians Jr, O. J. Circumarctic map of permafrost and ground ice conditions. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Permafrost*, 2, 1132-1136. Wushan Guangzhou, China: South China University of Technology Press, 1993.
- [11] Wang, C., Wang, Z., Kong, Y., Zhang, F., Yang, K. ve Zhang, T. Most of the northern hemisphere permafrost remains under climate change. *Scientific reports*, 9(1), 3295, 2019.
- [12] IPCC. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (ed.)]. 616 s., 2019.
- [13] Chen, Y., Lara, M. J., Jones, B. M., Frost, G. V. ve Hu, F. S. Thermokarst acceleration in Arctic tundra driven by climate change and fire disturbance. *One Earth*, 4(12), 1718-1729, 2021.
- [14] Connon R., Devoie É., Hayashi M., Veness T. ve Quinton W. The influence of shallow taliks on permafrost thaw and active layer dynamics in subarctic Canada. *J Geophys Res Earth* 123(2):281–297, 2018.
- [15] Mishra, U., Hugelius, G., Shelef, E., Yang, Y., Strauss, J., Lupachev, A., Harden, J.W., Jastrow, J.D., Ping, C.-L. ve Riley, W.J. Spatial heterogeneity and environmental predictors of permafrost region soil organic carbon stocks. *Sci. Adv.* 7, eaaz5236, 2021.
- [16] Schädel, C., Schuur, E. A., Bracho, R., Elberling, B. O., Knoblauch, C., Lee, H., ... ve Turetsky, M. R. Circumpolar assessment of permafrost C quality and its vulnerability over time using long-term incubation data. *Global Change Biology*, 20(2), 641-652, 2014.
- [17] Schuur, E. A., McGuire, A. D., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J. W., Hayes, D. J., ... ve Vonk, J. E. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 520(7546), 171-179, 2015.
- [18] MacDougall, A. H., Zickfeld, K., Knutti, R. ve Matthews, H. D. Sensitivity of carbon budgets to permafrost carbon feedbacks and non-CO2 forcings. *Environmental Research Letters*, 10(12), 125003, 2015.
- [19] Burke, E. J., Ekici, A., Huang, Y., Chadburn, S. E., Huntingford, C., Ciais, P., ... ve Krinner, G. Quantifying uncertainties of permafrost carbon-climate feedbacks. *Biogeosciences*, 14(12), 3051-3066, 2017.
- [20] Lowe, J. A. ve Bernie, D. The impact of Earth system feedbacks on carbon budgets and climate response. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376 (2119), 20170263, 2018.
- [21] Hjørt, J., Streletskiy, D., Doré, G., Wu, Q., Bjella, K. ve Luoto, M. Impacts of permafrost degradation on infrastructure. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(1), 24-38, 2022.
- [22] <https://climate.mit.edu/explainers/permafrost>. McGee, D., Gribkoff, E. Permafrost. MIT Climate Portal (CC BY-NC-SA 4.0). Ağustos 2023.
- [23] Froese, D. G., Westgate, J. A., Reyes, A. V., Enkin, R. J. ve Preece, S. J. Ancient permafrost and a future, warmer Arctic. *Science*, 321(5896), 1648-1648, 2008.
- [24] Christie, A. Blast from the Past: Pathogen Release from Thawing Permafrost could lead to Future Pandemics. *Cambridge Journal of Science & Policy*, 2 (2), 1-8, 2021.
- [25] Yarzabal, L. A., Salazar, L. M. B. ve Batista-García, R. A. Climate change, melting cryosphere and frozen pathogens: Should we worry...?. *Environmental Sustainability*, 4(3), 489-501, 2021.
- [26] Rigou, S., Santini, S., Abergel, C., Claverie, J. M. ve Legendre, M. Past and present giant viruses diversity explored through permafrost metagenomics. *Nature Communications*, 13(1), 5853, 2022.
- [27] Wu, R., Trubl, G., Taş, N. ve Jansson, J. K. Permafrost as a potential pathogen reservoir. *One Earth*, 5(4), 351-360, 2022.
- [28] DeConto, R. M., Galeotti, S., Pagani, M., Tracy, D., Schaefer, K., Zhang, T., ... ve Beerling, D. J. Past extreme warming events linked to massive carbon release from thawing permafrost. *Nature*, 484(7392), 87-91, 2012.
- [29] Randers, J. ve Goluke, U. An earth system model shows self-sustained thawing of permafrost even if all man-made GHG emissions stop in 2020. *Scientific Reports*, 10(1), 18456, 2020.
- [30] Comyn-Platt, E., Hayman, G., Huntingford, C., Chadburn, S. E., Burke, E. J., Harper, A. B., ... ve Sitch, S. Carbon budgets for 1.5 and 2 C targets lowered by natural wetland and permafrost feedbacks. *Nature Geoscience*, 11(8), 568-573, 2018.
- [31] Zachos, J. C., Dickens, G. R. ve Zeebe, R. E. An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics. *Nature*, 451(7176), 279-283, 2008.



Buzul İzostatik Dengeleme (GIA) ve Horseshoe Adası'nda (Batı Antarktika Yarımadası) Bulunan Yükselmiş Basamaklı Kıyı Yapılarının Önemi

Mehmet Korhan Erturaç

Gebze Teknik Üniversitesi, Yer ve Deniz
Bilimleri Enstitüsü
erturac@gtu.edu.tr

Giriş

Dünyamız tarihi boyunca önemli değişiklikler geçirmiştir, bunlardan, nispeten genç dönemlerdeki, en belirginini ise sıcak-soğuk dönem döngüleridir. Buzul Çağı olarak adlandırdığımız, günümüze göre soğuk dönemlerde, yüzlerce metre kalınlıktaki buz kütleleri ilerleyerek Kuzey Yarımküre'de önemli alanları örtmüş, günümüzdeki buzul arası dönemlerde de eriyerek Kuzey Kutup Dairesi'nde kalan kara alanlarına (Kanada Kuzeyi ve Grönland gibi)

çekilmişlerdir. Bu sürecin bir sonucu olarak okyanuslarda deniz seviyesi ~120 m düşmüş ve yer yüzeyi buzullaşan bölgelerde devasa bir yüke maruz kalmıştır. Buzul çağlarındaki bu kütle değişimleri, kabuk üzerindeki yükü artırmış, yerin çekim alanını ve dönüş hızının dahi değişmesiyle sonuçlanmıştır [1].

Günümüzde Antarktika Kıtası'nın büyük bir kısmı ortalama kalınlığı 1.9 km olan buzul örtüsü, kıyı alanları ise buz sahanlıkları ile kaplı durumdadır. Son buzul arası dönem olan Holosen'den itibaren başlayan buzullarda gerileme ve incelmeye günümüz küresel iklim krizi nedeniyle hızlandığı ortaya konulmaktadır [2, 3]. Kıta genelinde buz sahanlıklarının son 25 yıl içerisinde %1.9 alan kaybettiği bulgulanmıştır [4].

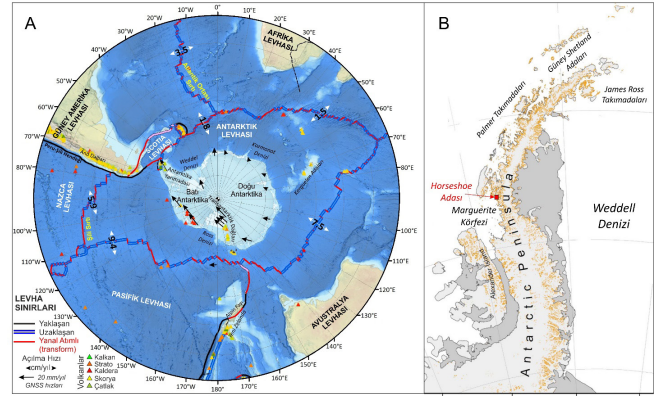
Buzul örtüsündeki bu değişimin doğrudan iki etkisi bulunmaktadır. (I) Antarktika kıtası izostatik olarak kalın buzul örtüsü altında baskılanmaktadır, bu düşük yüzlerce metrelik genlik ve binlerce kilometre dalga boyuna sahip baskılamaya gezegenimizin (katı yerküre, kütleçekim alanı ve okyanusların) cevabı günümüzde önde gelen araştırma sorularından birisidir [1]. Antarktika'daki buzul örtüsünün tamamen kalkması durumunda kıtanın 936 metre yükseleceği modellenmektedir [5]. (II) buzul ve buz sahanlıklarının erimesi deniz seviyesinin yükselmesine doğrudan katkı sağlamaktadır. Antarktik buzul örtüsünün tamamen erimesi sonucu deniz seviyesi yükselmesine +58 m katkı sağlayacağı modellenmiştir [6].

Buzul İzostatik Dengeleme (GIA)

Buzul İzostatik Dengeleme (Glacial Isostatic Adjustment, GIA) küresel buzul örtülerinin ilerlemesi ve gerilemesi ile kara alanlarında gerçekleşen santimetre mertebesinde hızla yükselme ve/veya çökmeyi açıklar [1]. Yer üzerindeki etkileri küresel olan GIA, buzul örtülerinin geri çekilmesinden binlerce yıl sonra bile gözlemlenen bir doğa olayıdır. Örneğin Kuzey Avrupa'da geçmişte buzul örtüsü altında kalan çoğu alan bugün 1 cm/yıl hızla yükselmektedir, bunun sonucu olarak İsveç'te bir liman kenti olan Östhammar sürekli yükselme nedeniyle kıyı gerisinde kalmış ve 1491 yılında taşınmıştır.

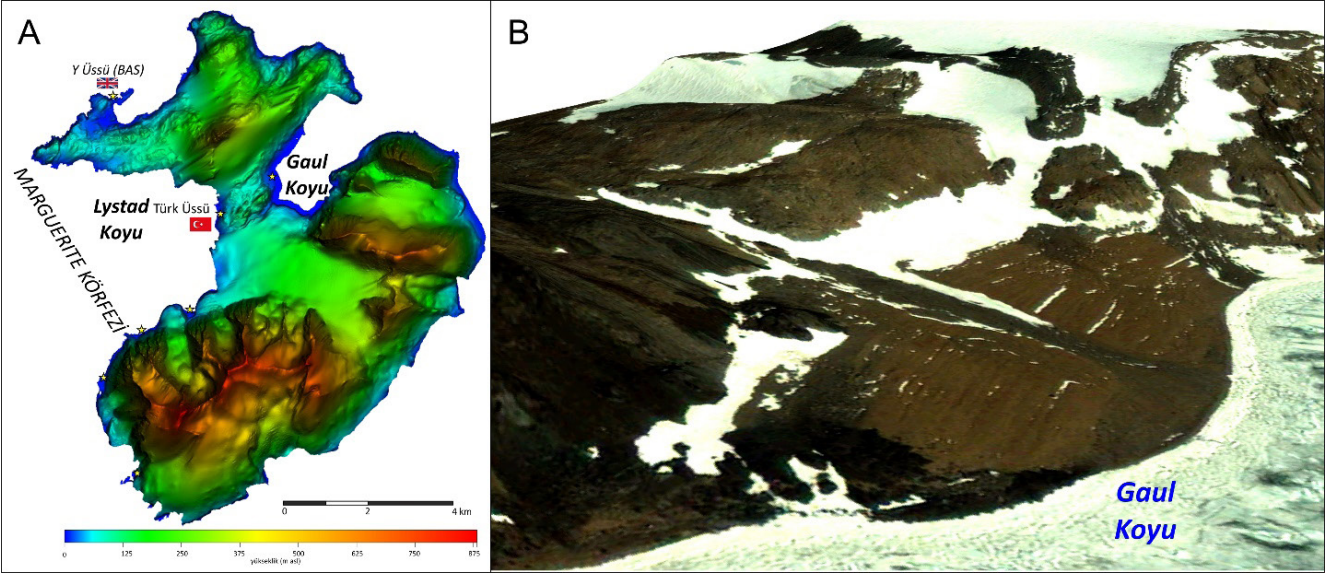
Antarktika'da (Şekil 1A) Son Buzul Maksimum

(~21 bin yıl) döneminin sonlanmasından itibaren gerçekleşen buzul örtüsünün gerilemesi, kara alanında belirgin yükselmeye neden olmaktadır [7, 8]. Holosen boyunca Antarktika Yarımadası'nda buzul gerilemesinin tarihçesi üzerine hipotezler, ilerleyen (zaman içerisinde artan) ya da salınımlı (artan-azalan) yükselme öngörmektedir [9]. Bu modeller manto vizkozitesi ve kabuk kalınlığı ile doğrudan ilgilidir. GIA modelleri, kıyı alanlarında bulgularan fosilleşmiş göreceli deniz seviyesi belirteçleri (RSL) kullanılarak oluşturulmuş ve günümüzde de sürekli GNSS ölçümleri ile geliştirilmektedir. Antarktika yarımadası ve çevresinde (Şekil 1B) (Güney Shetland Adaları ve Marguerite Körfezi kıyılarında) yükselmiş deniz seviyesi belirteçleri yaygın olarak bulunmaktadır [10, 11, 12, 13, 14]. Bu mutlak ölçümler ve tarihlendirme sonuçları kıtadaki sürekli GNSS ölçümleri ile birlikte değerlendirilerek bölgesel buzul örtüsü kaybı, yükselme ve GIA modellenmektedir [1, 5, 15, 16, 17].



Şekil 1 A. Antarktika Kıtası'nın tektonik konumu **B.** Antarktika Yarımadası içerisinde Horseshoe Adasının konumu (buzul ile örtülü olmayan alanlar sarı ile gösterilmiştir).

Antarktik Yarımadası'nda ilk kıyıların Holosen içerisinde (9.6 bin yıl önce) [12] açığa çıktığı bulgulanmıştır. Antarktika'da yükselme ve buzul gerilemesi etkileşiminin (karaya oturma çizgisi) Holosen içerisinde karmaşık bir ilişkiye sahip olduğu ortaya konulmuştur [8, 15]. Geniş alanlarda zaman ve mekan içerisinde farklılaşmış yükselmenin anlaşılabilmesi için kıta boyunca mümkün olduğunca çok RSL belirtecinin tanımlanması, ölçümünün ve tarihlendirmesinin yapılması gerekmektedir [7, 12, 15].



Şekil 2 A. Horseshoe Adası'nın detay topografyası (REMA) ve B. Gaul Koyu kıyısında gözlenen ve basamaklı geometri sunan depolanmalı yerşekillerinin Google Earth görüntüsünden eğik görünümü

Horseshoe Adası'ndan GIA modellerine katkı

Türk Antarktik Bilimsel Araştırma Üssü'nün yer aldığı Batı Antarktika Yarımadası Marguerite Körfezi'nde yer alan Horseshoe Adası'nda (Şekil 2A) önceki gözlemlerde ve yayınlarda [10] bulgularanan ve geçmiş deniz seviyesini işaret eden depolanmalı ve aşınmalı kıyı yer şekilleri yaygın olarak bulunmaktadır. Bu yapılar adanın doğusunda Gaul Koyunda, batı güneybatısında ve kuzeyinde gözlenmektedir (Şekil 2B).

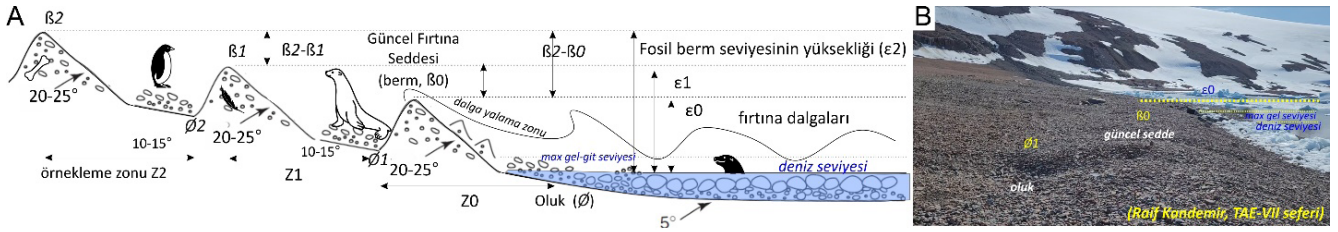
Ön saha gözlemlerinde (TAE-VII, Raif Kandemir) Gaul koyu özelinde kıyından 170 m karaya uzanan ve ~25 metre yüksekliğe ulaşan, ~16 sedde-oluk basamaklanması bulgulanmıştır (Şekil 3).

Kıyı alanlarında geçmiş deniz seviyesi belirteçleri kapsamlı olarak sınıflandırılmış ve yönergeleri tanımlanmıştır [18]. Buna göre kıyı depolarının ya da yapılarının kullanılabilir RSL kaydı olarak değerlendirilebilmesi için öncelikle detaylı olarak tanımlanması, depolanma ortamının belirlenmesi ve güncel karşılığı ile ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Bu aşamadan sonra fosil RSL belirtecin ve güncel karşılığının yüksekliklerinin hassas olarak ölçülmesi, karşılaştırılması ve mutlak yöntemlerle tarihlendirilmesi ile ilgi alanda RSL kaydı kurulabilir [10, 11, 15, 18].

Şekil 4A da yüksek enerjili bir kıyı ortamında hipotetik fırtına seddesi (berm) basamaklanması sunulmaktadır [18; 19]. Buna göre seddele-



Şekil 3 Gaul koyunun batıdan doğuya bakış ile görünümü ve basamaklı çökel sırtların dizilimi



Şekil 4 A Yükselen kıyılarda basamaklanmalı fırtına seddelerinin geometrisi ve hipotetik oluşum modeli. B Gaul Koyu aktif fırtına seddesinin görünümü

rin deniz yönündeki yamaçları $20-25^\circ$ arasında eğim sunmakta ve plaj yüzünde bu eğim $10-15^\circ$ olmaktadır. Bu sınıflamaya göre fosil $\beta 2$ seddesinin deniz seviyesinden yüksekliği $\epsilon 2$, modern analogundan göreceli yüksekliği ise $\beta 2-\beta 0$ olarak tanımlanır. Bu morfodinamik model içerisinde Gaul Koyu kıyısındaki güncel fırtına seddesinin görünümü Şekil 4B'de sunulmaktadır. Çakıl köken kayacının pembe renkli metagranitler olduğu bilinmektedir [20] ve boyutlarının ortalama $5-10\text{ cm}$ ve düşük olgunluğa sahip oldukları görülmektedir.

TAE-VIII kapsamında yürütülecek saha çalışması ile bu yapıların sedimentolojik ve geometrik özellikleri detaylandırılacaktır. Bu yapıların oluşturan morfodinamikler güncel karşılıkları gözetilerek ortaya konulması hedeflenmektedir. Saha çalışmaları sırasında kıyı çizgisi boyunca ortalama deniz seviyesi ve en yüksek gel seviyesine yönelik jeomorfolojik kanıtlar da belirlenecektir.

Bu tanım içerisinde odak bölgelerdeki hedef kıyı yapılarının hassas olarak haritalanması gerekmektedir. Bu amaca yönelik olarak saha gözlemleri ve ölçümleri ile alçak irtifa İHA uçuşları elde edilecek sayısal hava fotoğraflarının fotogrametrik değerlendirilmesi ile nokta bulutları, ortofotoğraflar ve sayısal yüzey modelleri üretilmesi planlanmaktadır. Bu verilerin değerlendirilmesi ile hedef yer şekillerinin yükseklikleri, genişlikleri, çakıl yönelimleri, yüzey eğim değişimleri vb bilgiler elde edilecektir.

Taraça çökellerinin depolanma ve yüzeyleme tarihçesinin anlaşılması

Çalışmanın yaklaşımının en önemli bileşenlerinden birisi Horseshoe adasının yüksek enerjili kıyılarında depolanmış kaba taneli çökellerden oluşan basamaklı yapıların oluşum zamanları-

nın ortaya konulmasıdır. Kuzey ve güney kutup dairelerinde ve Antarktika özelinde yapılan çalışmalarda mutlak radyokarbon [10] ve model tarihlendirme yöntemlerinden kozmojenik yüzey tarihlendirmesi [12,21] ve lüminesans protokolleri [13,14,22,23,24] başarıyla uygulanmış ve zaman içerisinde deniz seviye değişimini gösteren RSL eğrileri elde edilmiştir. Bu tarihlendirme yöntemlerden herbirinin kendine ait avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında da Horseshoe Adası'ndaki yükselmiş kıyı çökellerinin oluşum zamanının anlaşılması için, lüminesans (OSL), kozmojenik radyonüklid yüzey tarihlendirme (CRN) ve radyokarbon tarihlendirme teknik, yaklaşım ve protokolleri kullanılacaktır. Uygulama alanının morfodinamik özgünlüğü, örnekleme (saha çalışması) öncesi ve sırasında her bir yöntemin yaklaşımına uygun bir strateji geliştirilmesini gerektirir.

Çalışma kapsamında elde edilecek her verinin karşılıklı değerlendirilmesi ile kıyı basamaklanmasının oluşum tarihçesi ve Horseshoe Adası özelinde RSL eğrilerinin oluşturulması hedeflenmektedir.

Katkı Belirtme

Mavi Gezegen Kutup Araştırmaları özel sayısı için tanıtılan bu çalışma, T.C. Cumhurbaşkanlığı himayesinde, T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı uhdesinde ve TÜBİTAK-Marmara Araştırma Merkezi Kutup Araştırmaları ve Uygulama Merkezi koordinasyonunca 2024 yılında gerçekleştirilecek 8. Antarktika Bilim Seferi (TAE-VIII) kapsamında 122G261 kodlu TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmektedir.

Kaynakça

- [1] Whitehouse P. L. Glacial isostatic adjustment modeling: historical perspectives, recent advances, and future directions. *Earth Surface Dynamics*, 6(2), 401-429, 2018.
- [2] Shepherd A., Ivins E., ... (IMBIE Teams). Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017". *Nature*. 558 (7709): 219–222, 2018.
- [3] Stammerjohn S. E. ve Scambos T. A. Warming reaches the South Pole. *Nature Climate Change*. 10 (8): 710–711, 2020.
- [4] Greene C. A., Gardner A. S., Schlegel N. J. ve Fraser A. D. Antarctic calving loss rivals ice-shelf thinning. *Nature*, 609(7929), 948-953.24, 2022.
- [5] Paxman Guy J. G., ... "Inference of the Timescale[] Dependent Apparent Viscosity Structure in the Upper Mantle Beneath Greenland." *AGU Advances* 4.2,e2022AV000751, 2023.
- [6] Slater T., Hogg A. E. ve Mottram R. Ice-sheet losses track high-end sea-level rise projections. *Nature Climate Change*. 10 (10): 879–881, 2020.
- [7] Verleyen E., Hodgson D. A., Milne G. A., Sabbe K. ve Vyverman W. Relative sea-level history from the Lambert Glacier region, East Antarctica, and its relation to deglaciation and Holocene glacier readvance, *Quaternary Res.*, 63, 45–52, 2005.
- [8] Kingslake J., Scherer R. P., Albrecht T., Coenen J., Powell R. D., Reese R., ... ve Whitehouse P. L. Extensive retreat and re-advance of the West Antarctic Ice Sheet during the Holocene. *Nature*, 558(7710), 430-434, 2018.
- [9] Ivins E. R., Raymond C. A. ve James T. S. The influence of 5000 year-old and younger glacial mass variability on present-day crustal rebound in the Antarctic Peninsula. *Earth Planets and Space* 52, 1023–1029, 2000.
- [10] Bentley M. J., Hodgson D. A., Smith J. A. ve Cox N. J. Relative sea level curves for the south Shetland islands and marguerite bay, Antarctic Peninsula. *Quaternary Science Reviews*, 24(10-11), 1203-1216, 2005.
- [11] Fretwell P. T., Hodgson D. A., Watcham E. P., Bentley M. J. ve Roberts S. J. Holocene isostatic uplift of the South Shetland Islands, Antarctic Peninsula, modelled from raised beaches. *Quaternary Science Reviews*, 29(15-16), 1880-1893, 2010.
- [12] Bentley M. J., Johnson J. S., Hodgson D. A., Dunai T., Freeman S. P. H. T. ve Cofaigh C. Ó. Rapid deglaciation of Marguerite Bay, western Antarctic Peninsula in the early Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 30(23-24), 3338-3349, 2011.
- [13] Simms A. R., DeWitt R., Kouremenos P. ve Drewry A. M. A new approach to reconstructing sea levels in Antarctica using optically stimulated luminescence of cobble surfaces. *Quaternary Geochronology*, 6, 50–60, 2011.
- [14] Simms A. R., Bentley M. J., Simkins L. M., Zurbuchen J., Reynolds L. C., DeWitt R. ve Thomas E. R. Evidence for a "Little Ice Age" glacial advance within the Antarctic Peninsula—Examples from glacially-overrun raised beaches. *Quaternary Science Reviews*, 271, 107195, 2021.
- [15] Johnson J. S., Venturelli R. A., Balco G., Allen C. S., Braddock S., Campbell S. ve Woodward J. Existing and potential evidence for Holocene grounding line retreat and readvance in Antarctica. *The Cryosphere*, 16(5), 1543-1562, 2022.
- [16] Pittard M. L., Whitehouse P. L., Bentley M. J. ve Small D. An ensemble of Antarctic deglacial simulations constrained by geological observations. *Quaternary Science Reviews*, 298, 107800, 2022.
- [17] van der Wal W., Barletta V., Nield G. ve van Calcar C. Glacial isostatic adjustment and post-seismic deformation in Antarctica. *Geological Society, London, Memoirs*, 56, 315-341, 2022.
- [18]. Rovere A., Raymo M. E., Vacchi M., Lorscheid T., Stocchi P., Gomez-Pujol L., ... ve Hearty P. J. The analysis of Last Interglacial (MIS 5e) relative sea-level indicators: Reconstructing sea-level in a warmer world. *Earth-Science Reviews*, 159, 404-427, 2016.
- [19] Oxford J. D., Forbes D. L. ve Jennings S. C. Organizational controls, typologies and time scales of paraglacial gravel-dominated coastal systems. *Geomorphology*, 48(1-3), 51-85, 2002.
- [20] Matthews D. W. The geology of Horseshoe and Lagotellerie Islands, Marguerite Bay, Graham Land. *British Antarctic Survey Bulletin* 52, 125–154, 1983.
- [21] Rhee H. H., Lee M. K., Seong Y. B., Hong S., Lee J. I., Yoo K. C. ve Yu B. Y. Timing of the local last glacial maximum in Terra Nova Bay, Antarctica defined by cosmogenic dating. *Quaternary Science Reviews*, 221, 105897, 2019.
- [22] Simkins L. M., DeWitt R., Simms A. R., Briggs S. ve Shapiro R. S. Investigation of optically stimulated luminescence behavior of quartz from crystalline rock surfaces: a look forward. *Quaternary Geochronology*, 36, 161–173, 2016.
- [23] Souza P. E., Sohbaty R., Murray A. S., Clemmensen L. B., Kroon A. ve Nielsen L. Optical dating of cobble surfaces determines the chronology of Holocene beach ridges in Greenland. *Boreas*, 50, 606–618, 2021.
- [24] Hong S., Lee M. K., Seong Y. B., Owen L. A., Rhee H. H., Lee J. I. ve Yoo K. C. Holocene sea-level history and tectonic implications derived from luminescence dating of raised beaches in Terra Nova Bay, Antarctica. *Geosciences Journal*, 25(3), 283-



Antarktika Gölleri

14,2 milyon km²lik alana sahip olan el değmemiş Antarktika kıtası bilimsel araştırmaların ilgi odağıdır. 1820’de keşfedilen kıtada hala büyük bir bilinmezlik hâkimdir. Birçok disiplinin bir arada çalışarak yeni bulgular ortaya koyduğu kıta farklı sınıflarda göllere de sahiptir. Bu göllerin hala keşfedilmemiş kısımları bulunurken bir bölümü üzerinde ise çalışmalar devam etmektedir.

Seval Yalçinkaya Bay

Istanbul Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü
yalcinkayas16@itu.edu.tr

Dünyanın güney yarım küresinde bulunan Antarktika kıtasının yaklaşık %98’i buz örtüsüyle kaplı olup dünyadaki buzulların %90’ı bu kıtada bulunmaktadır (Şekil 1). Kıtanın kıyı bölgelerinde buzdan arınmış alanlar mevcuttur. İç kesimlerde yıl boyunca ortalama sıcaklık -57°C olup, kış mevsimlerinde en düşük sıcaklık -90°C ’dir. Kıyı kesimler iç kısımların aksine daha sıcaktır ve kıyı kesimlerde yaz aylarında maksimum sıcaklık -2°C ile -8°C arasında değişir. Antarktika yağış alma özellikleri itibariyle bir çöl olarak değerlendirilmektedir. Kıyı bölgelerinde yıllık ortalama yağış miktarı sadece 166 mm’dir. İç kısımlara doğru gidildiğinde ise yıllık ortalama yağış miktarı daha da azalmaktadır. Soğuk olması nedeniyle de kar kütlesi erimez.



Şekil 1- Antarktika Kıtası [1]

Antarktika kıtası diğer kıtalara nazaran daha az biyokütle içerir ve bu mevcut biyokütlenin çoğu kıyı kısmında bulunur. Çoğunlukla denizel ortamlarda bulunan kriller, foklar, penguenler, balinalar ve bunlara ek diğer kuşlar besin zincirinin bir parçasıdır.

1959 yılında imzalanan Antarktika Antlaşmaları Sistemi (ATS) kapsamında hiçbir ülke kıtada hak iddia edemez. Kıta uluslararası bilimsel iş birliğinin teşvik edildiği bir doğa koruma alanıdır. Antlaşmada 29 danışman ülke ve 25 gözlemci ülke olarak toplamda 54 ülke bulunmaktadır (Şekil 2). Böylelikle bir dizi çevre protokolü ile bilimsel faaliyetler kontrol altında gerçekleştirilmektedir [2].



Şekil 2- Antarktika Antlaşmaları Sistemindeki ülkeler [2]

ATS kapsamında insanların sadece bilimsel faaliyetler gerçekleştirebildikleri kıtanın, hem iklim şartlarının elverişsiz olması hem de lojistik olarak zor bir bölgede olması nedeniyle geçmişten bugüne hala doğal yapısı korunmaktadır. Dolayısıyla yerkürenin geçmişinin jeolojik süreçler bakımından anlaşılması açısından bir kara kutudur. Bu durum kıtada önemli limnoloji çalışmalarına olanak sağlamaktadır.

Antarktika kıtası göl türleri bakımından geniş bir yelpazeye sahiptir (Şekil 3). Çoğu daha önce hiç görülmemiş veya tanımlanmamış organizmalara ve süreçlere sahiptir. Belirli alanlara sahip durgun su kütlelerinden oluşan göller kendi içlerinde birçok türe göre sınıflandırılır. 1965 yılın-

da Hutchinson'a göre 76 alt türe ayrılan 11 ana göl türü tanımlanmıştır; tektonik göller, volkanik göller, buzul göller, akarsu göller, çözüm gölleri, heyelan göller, rüzgar göller, kıyı göller, organik göller, antropojenik göller, göktaşı (dünya dışı etki) göller [3]. Bunun dışında göller kökenlerine, ekolojiye, su kimyasına ve büyüklüklerine göre de sınıflandırılır. Bu sınıflandırmalara ait bazı göl türleri Antarktika kıtasında bulunmaktadır



Şekil 3- Antarktika Horseshoe Adası'nda bulunan göller (TAE-VII kapsamında yapılan arazi çalışmasından)

Antarktika kıtasında göl türlerinden yüzey gölleri, buzul üstü gölleri, kıyı gölleri, epişelf gölleri ve buzulaltı gölleri görülmektedir. Yüzey gölleri tatlı sudan aşırı tuzluya kadar değişkenlik göstermektedir. Çoğunlukla yüzey gölleri Ross Denizi ile Doğu Antarktika'nın iç buz örtüsü arasında yaklaşık 4000 km²'lik bir alanı kaplayan buzsuz büyük McMurdo Kuru Vadileri'nde (77° 28G, 162° 31D) görülmektedir [4,5].

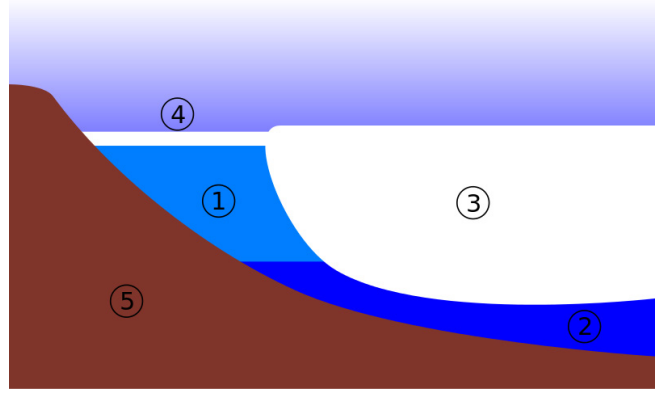
Tatlı su gölleri, eriyen buzul sularının göllere girdi sağladığı bölgelerde, buz örtülerinin ve buzulların yüzeylerinde bulunur. Bu tip göller genellikle buzul üstü göller olarak adlandırılmaktadır. Bu göl türü farklı boyutlarda olabilirken yarıçapı 150 metreden büyük olanlar buzul hareket hızını etkilemektedir. Buzulun hidrolik kırılması buzul katmanını boyunca yarık ve çatlaklar oluşturur. Bundan dolayı göl bu açıklıklardan su kaybeder ve buzul tabanına su girişi sağlayarak buzulun parçalanarak çökmesini/erimesini sağlamaktadır. Bazı buzul üstü göller uzun ömürlüken bazıları kısa süre varlık gösterir [6]. Bu göller yaz aylarında oluşurlar ve buzulun içinde erimeyle oyulması sonucunda (moulin) boşalıp kaybolurlar [7,8].

Kıyı gölleri her yaz birkaç haftadan birkaç aya kadar değişen süre zarfında buz örtülerinin tamamını veya bir kısmını kaybetmektedir (Şekil 4). Bu göller, buzullara veya buz tabakasına bitişik olduğu yerlerde kalın ve çok yıllık buz örtülerine sahiptir.

Göl mekanizmasının beslediği kaynak buzuldur. Bunlara örnek, Doğu Antarktika'daki Prens Elizabeth toprakları olarak adlandırılan bölgede Sorsdal Buzulu'na bitişik olan Chelnok Gölü (68°38'44.2G, 78°20'26.2D) ve Vestfold Tepelerindeki (68°33'0G, 78°15'0D) buz tabakasına bitişik bir dizi isimli göl bulunmaktadır [9]. Antarktika Yarımadasının kuzeydoğusunda bulunan Güney Orkney Adaları'nın (60°36'G 45°30'B) buzlu bölgelerinde birçok göl bulunmaktadır. Bu göller tatlı su sistemlerine sahiptir. Ayrıca yosunlar, likenler ve otlardan oluşan bitki örtüsüne

sahip oldukları için kıtasal göllerden farklıdır [10].

Epışelf göller (Şekil 5), buz sahanlıklarına bitişik olup daha soğuk ve yoğun deniz suyunun üzerinde yer alabilen veya bir buzulun altındaki bir kanal yoluyla denize bağlanabilen tatlı su gölleridir. Bu tatlı su tabakasının derinliği buz rafı ile sınırlıdır. Göl yüzeyinin yüksekliği, buz şelfinin altında deniz olmasından dolayı gel-git olaylarına bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Bu göller, küresel ısınma sonucunda buz sahanlıklarının çöküşü nedeniyle kuzey kutup bölgelerinde yok olmak üzereyken güney kutbuna has bir göl türü olarak bilinmektedir. Kıtadaki en büyük epışelf gölüne örnek olarak MacRobertson Toprakları'ndaki Beaver Gölü gösterilebilir (70°48'00"G, 68°20'00"D) [11].



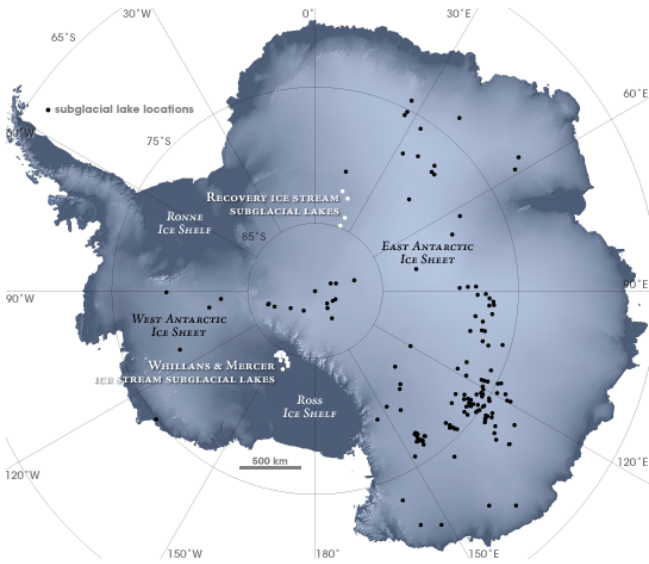
Şekil 5- Epışelf gölünün oluşum şekli (1-tatlı su tabakası, 2-deniz katmanı, 3-buz şelfi, 4-göldeki buz örtüsü ve 5-kara kütlelerini temsil etmektedir.) [10]



Şekil 4. Güney Shetland Adaları'ndan birisi olan Robert Adası'ndaki kıyı gölleri (Fotoğraf: Raif Kandemir)

Antarktika kıtasının buz örtüsünün altında 380'den fazla buzul altı gölü bulunmaktadır [12] (Şekil 6). Buzul altı göllerinin oluşum mekanizması; buzulun ağırlığından dolayı yüksek basınç altında suyun donma sıcaklığının aşağı düşmesiyle gelişir. Buzulun tabanı ile ana kaya arasında sürtünme oluşarak o alanda buz sıvı hale geçer. Suyun buza temas ettiği yerlerde zaman içinde buz (~1-2 mm/yıl) erir [13]. Bu erime, suları buzul altında biriktirerek buzul altı göllerini oluşturur.

En iyi bilinen buzul altı gölü Doğu Antarktika Buz Örtüsü altındaki 250 km uzunluğunda, 50 km genişliğinde ve yaklaşık 800 m derinliğe sahip olan Vostok Gölü'dür [14]. Geçmiş yıllardaki spekülasyonlardan sonra 1990'larda sismik ve radar görüntüleri ile gölün varlığı bilim insanları tarafından doğrulanmıştır. 2023 yılında Rus bilim insanlarının araştırmaları ile gölde bakteri DNA'sına ait kanıtlar olduğu doğrulanmıştır.



Şekil 6 – Antarktika kıtasında bilinen buzul altı göl haritası [15]

Göletler, küçük su alanlarından oluşmaktadır ve denizdeki sulak alanlar gibi yazın kısa ömürlüdürler. Transantartik Dağları'nın dibinde bulunan Don Juan Göleti (77°33'G, 167°10'D) en popüler olanıdır. Suyun donma noktasının altında -50° C'ye kadar sıvı kalabilen bu göller, kalsiyum klorür açısından zengin, gezegenimizin en tuzlu su kütleleridirler. Göletin su ve tuz kaynağı Mars'ta da benzer bir şekilde suyun var olabileceği hipotezi üzerinde bilim insanlarının yoğun-

laşmasına neden olup, dünya dışı çalışmaları için de bir analog bölge olmuştur [16].

Antarktika kıtasında göl oluşumundaki ana etki buzul süreçleridir. Buna ek olarak tektonik süreçler de önemli ölçüde bölgede etkilidir. Bunlara en iyi örnek tektonik açılmaya bağlı olarak gelişmiş bir rift vadisi içinde oluşan Vostok Gölü'dür. Diğer buzul altı göllerde tektonik aktivitelerden kaynaklanan vadilerde bulunmaktadır [14].

Buzul dönemlerinde kalın buz örtülerinin neden olduğu buzul erozyonunun, kıtadaki göllerin oluşumunda da etkisi bulunmaktadır. Buzul vadileri tipik olarak dik kenarlı ve "U" şeklindedir [17]. Periglasiyal ortamlarda, yüksek tortul taşıma ve biriktirme oranları birbirleriyle ilişkilidir. Bu nedenle bir vadinin ağzında biriken tortul hali hazırda bir drenaj sistemini tıkayarak baraj şeklinde bir göl oluşturabilir.

Tüm bu göl mekanizmaları dünyanın jeolojik süreçlerinde kilit rol üstlenmektedir. Farklı oluşum mekanizmalarıyla oluşan göller biyoçeşitlilik, su temini, taşkın kontrollü rekreasyon, iklim düzenlenmesi ve kültürel önem bakımından insan yaşamında önemli bir yerdedir. Daha özele indirgediğimizde Antarktika ve Güney Okyanusu küresel iklim değişikliği sisteminin düzenlenmesinde büyük rolü vardır. Bu nedenle Antarktika, küresel iklim değişikliğinin etkilerini önlemek ya da azaltmak amaçlı bilimsel çalışmalar için en iyi bölgedir. Bunun yanı sıra yüksek biyoçeşitlilik olması ve insan yaşamından uzak olması sebebiyle Dünya'nın geçmişini anlama konusunda rehber olmaktadır.

Kriyosfer, tektonizma, biyo-jeokimyasal süreçler, volkanizma, biyoçeşitlilik, buzulun erime/donma olayları vs. gibi konularda geçmişten beri bilim insanları göller üzerinde limnoloji çalışmaları yapmaktadır. Tüm bunlar göz önüne alındığında Antarktika kıtasındaki göller bilim insanlarının odaklandığı çalışma alanlarının başında gelmektedir. Bu nedenle başta göller olmak üzere tüm Antarktika kıtası Antarktika Antlaşmalar Sistemi'nde belirtilen kurallar çerçevesinde korunarak gelecek nesillere aktarılmalıdır [2].

Kaynakça

- [1] https://www.coolantarctica.com/gallery/scenic/views_of_antarctica.php
- [2] <https://www.bas.ac.uk/about/antarctica/the-antarctic-treaty/>
- [3] Leach J. H. ve Herron R. C. A review of lake habitat classification. The Development of an aquatic habitat classification system for lakes, 27-58, 1992.
- [4] Fountain A. G., Levy J. S., Gooseff M. N. ve Van Horn D. The McMurdo Dry Valleys: a landscape on the threshold of change. *Geomorphology*, 225, 25-35, 2014.
- [5] Laybourn-Parry J. A. Protozoan plankton ecology. Springer Science & Business Media. 1992.
- [6] Bayraktar C. Kutup Bilimleri Anksiklopedisi, Yaşam bilimleri, 94, 2023.
- [7] Hooward-Willias C. ve Vincent W. F. Microbial communities in southern Victoria Land streams (Antarctica) I. Photosynthesis. *Hydrobiologia*, 172, 27-38, 1989.
- [8] Hawes I. Eutrophication and vegetation development in maritime Antarctic lakes. In *Antarctic ecosystems: ecological change and conservation*. S. 83-90, Springer Berlin Heidelberg, 1990.
- [9] Gore D. B., Pickard J., Baird A. S. ve Webb J. A. Glacial Crooked Lake, Vestfold Hills, East Antarctica. *Polar Record*, 32, 19-24, 1996.
- [10] Fielding C. R. ve Webb J. A. Sedimentology of the Permian Radok Conglomerate in the Beaver Lake area of MacRobertson Land, East Antarctica. *Geological Magazine*, 132, 51-63, 1995.
- [11] Davies B. J., Hambrey M. J., Glasser N. F., Holt T., Rodés A., Smellie J. L., ... ve Blockley S. P. Ice-dammed lateral lake and epishelf lake insights into Holocene dynamics of Marguerite trough ice stream and George VI ice shelf, Alexander island, Antarctic peninsula. *Quaternary Science Reviews*, 177, 189-219, 2017.
- [12] Wright A. ve Siegert M. J. The identification and physiological setting of Antarctic subglacial lakes: An update based on recent discoveries. *Antarctic subglacial aquatic environments*, 192, 9-26, 2011.
- [13] <https://www.britannica.com/place/Lake-Vostok>. Rafferty J. P. Lake Vostok. *Encyclopedia Britannica*. Şubat 2023.
- [14] Tagliasacchi E. Kutup Bilimleri Anksiklopedisi, cilt 2. Yaşam bilimleri, 404, 2023.
- [15] Fricker H. A., Scambos T., Bindschadler R. ve Padman L. An active subglacial water system in West Antarctica mapped from space. *Science*, 315(5818), 1544-1548, 2007.
- [16] Toner J. D., Catling D. C., ve Sletten R. S. The geochemistry of Don Juan Pond: Evidence for a deep groundwater flow system in Wright Valley, Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*, 474, 190-197, 2017.
- [17] Pienitz R., Doran P. T. ve Lamoureux S. F. Origin and geomorphology of lakes in the polar regions. *Polar lakes and rivers: limnology of Arctic and Antarctic aquatic ecosystems*, 25-41, 2008.



Antarktik Mikrometeoritler

Mikrometeoritler basit olarak, birkaç yüz mikron boyutlarında, genellikle silikat minerallerinden ve camsı fazlardan bazen de sülfat, sülfid ve metallere oluşan Dünya dışı malzemeler olarak tanımlanabilir. Bu taneler aynı meteoritlerde olduğu gibi; Ay, Mars ve Asteroit kuşağından gelmektedir. Meteoritlerden farklı olarak ise diğer gezegenlerden ve “Kuyruklu Yıldızlardan da” örnekleri yeryüzüne ulaştırabilmektedir.

Taki Sönmez

İÜC Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Avcılar-İstanbul
Girne Mahallesi Nehir Sokak No:1-2
Maltepe İstanbul
Takisonmez26@gmail.com

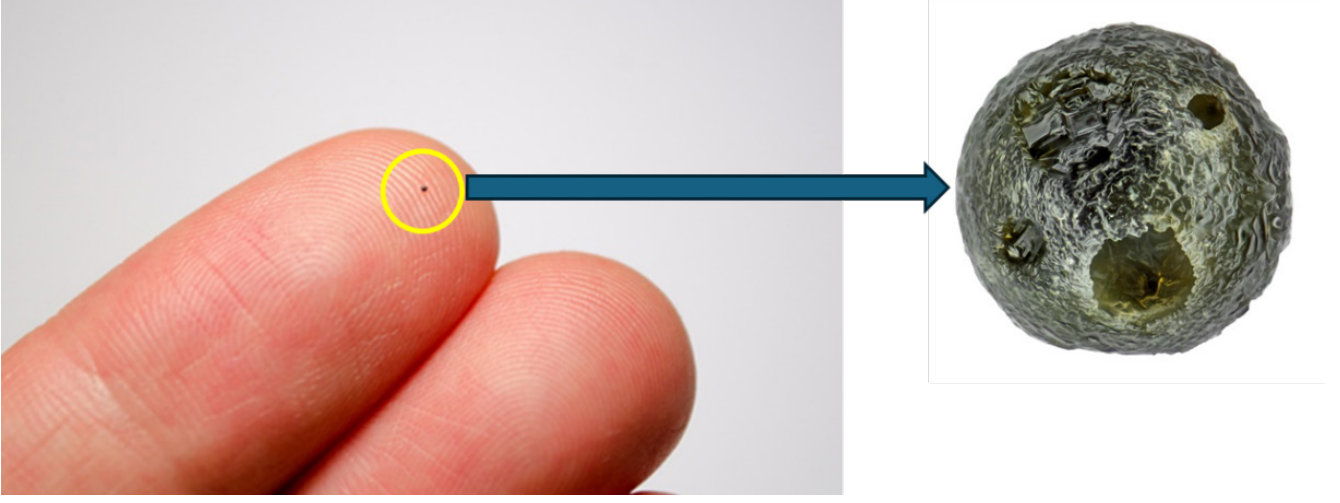
Namık Aysal

İÜC Mühendislik Fakültesi Jeoloji
Mühendisliği Bölümü Avcılar-İstanbul
aysal@iuc.edu.tr

Dünya’ya her yıl ortalama 10-2000 μm boyutları arasında, 40.000 ton kozmik toz gelmektedir [1,2]. Yeryüzüne kadar ulaşabilen, mikroskobik boyuttaki bu taneler, “Kozmik Toz”, “Mikrometeorit”, “Yıldız Tozu” gibi isimler alır (Şekil 1).

Mikrometeoritler basit olarak, birkaç yüz mikron boyutlarında, genellikle silikat minerallerinden ve camsı fazlardan bazen de sülfat, sülfid ve metallere oluşan Dünya dışı malzemeler olarak tanımlanabilir. Bu taneler aynı meteoritlerde olduğu gibi; Ay, Mars ve Asteroit kuşağından gelmektedir. Meteoritlerden farklı olarak ise diğer gezegenlerden ve “Kuyruklu Yıldızlardan da” örnekleri yeryüzüne ulaştırabilmektedir.

Mikrometeoritler, hem boyutlarından dolayı, hem daha bol bulunmalarından dolayı hem de kimyasal bileşimlerinin meteoritlerden farklı olması nedeniyle meteoritlerden farklı bir çalışma konusu olarak değerlendirilir [3].



Şekil 1. Mikrometeorit örneği (URL-2)

Mikrometeoritler nerede?

Mikrometeoritleri nerede bulabiliriz diye soracak olursak eğer bu sorunun birden fazla cevabı olacaktır. Çünkü mikrometeoritler, yürürken dahi üzerimize düşüyor olabilir.

Mikrometeoritler kentsel alanlarda, bina çatılarından, derin deniz çökeltilerinden, Antarktika'daki kar ve buz üzerinden, buz altında bulunan donmuş sedimanlardan veya çöl kumulları içerisinde elde edilebilir (Şekil 2 [4, 5, 6, 7, 8]).

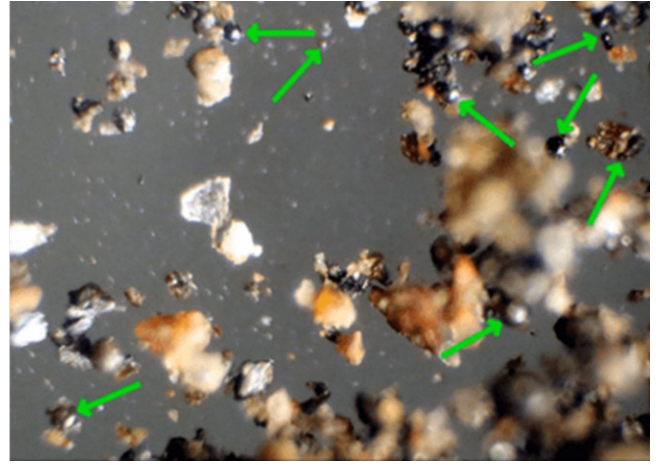
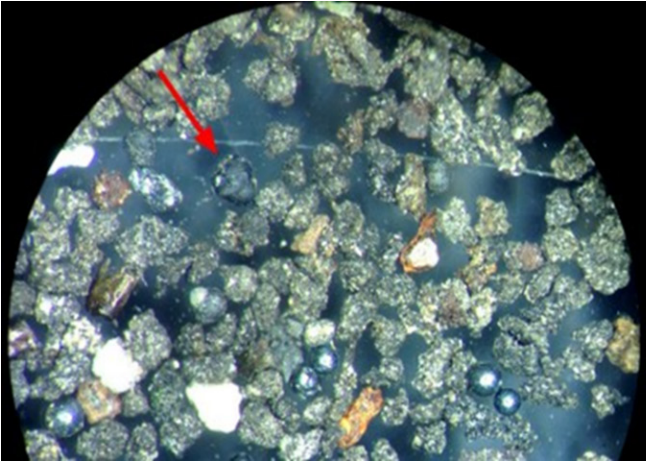
Ancak kentsel alanlarda bulunan mikrometeoritler hem fiziksel görünüşleri açısından hem de kimyasal bileşim tayini açısından bilimsel araştırmalarda çok doğru sonuçlar veremeyebilirler. Çünkü bu kozmik toz taneleri kolayca atmosferik koşullara ve insan aktivitesine maruz kalarak kirlenmiş olabilirler.

Mikrometeoritler daha çok Antarktika'daki kar ve buz eritilerek veya Antarktika'daki buzun altında bulunan donmuş sedimanlardan toplanmaktadır. Bunun nedeni Antarktika'da insan aktivitesinin çok az olması ve kozmik tozların herhangi bir yerel örnek ile karışmamasıdır. Antarktika meteorit araştırmaları için kapalı bir sistem gibidir.

Derin deniz sedimanları içerisinde de mikrometeoritlere rastlayabiliriz ancak denizlerin tuzlu suları nedeniyle bu alanlarda da mikrometeoritler kirlenmeye uğrayabilirler. Çöl ortamında bulunan kozmik taneler ise atmosferik olaylar nedeniyle ayrışmalara maruz kalabilirler. İnsan etkisinin son derece az olduğu ve atmosferik koşulların kozmik tanelere çok fazla etki etmediği Antarktika, mikrometeorit araştırmacılığı için son derece elverişli, izole bir ortam görevi görmektedir.



Şekil 2. Mikrometeoritlerin elde edilme yöntemleri: a-Kentsel alanlarda bina çatılarından; b-Antarktika'daki karlar eritilerek; c-Antarktika'da buzulun altında donmuş tortuların içinden (URL-2)



Şekil 3. Mikrometeoritlerin binoküler mikroskop görüntüleri (URL-3)

Dünya atmosferine giren kozmik tozların çoğu sürtünme nedeniyle ya buharlaşır ya da ergir ve yeniden kristallenirler. Bu nedenle mikrometeoritler birincil görünüşlerini, ilksel kimyasal bileşimlerini ve izotopik özelliklerini kaybederler (Şekil 3 [9, 10, 11]). Kozmik tanelerdeki bu farklılaşmaların birkaç nedeni vardır. Bunlar:

- Kozmik tanelerin atmosfere giriş açısı
- Kozmik tanelerin hızı
- Kozmik tanelerin atmosfere giriş açısı ve hızı, parçacıkların yeryüzüne ulaşip ulaşmama ve fiziksel, kimyasal bileşim değişimleri için önemli parametrelerdir.

Büyük ve hızlı mikrometeoritler atmosfere giriş sırasında sürtünme ve sıcaklık nedeni ile eriyip buharlaşırken, daha küçük ve daha yavaş parçacıklar atmosferik girişten eriyip buharlaşmadan yeryüzüne ulaşabilirler (Şekil 4). Yeryüzüne ulaşabilen kozmik tanelerin boyutları yaklaşık olarak 100-200 mikrondur.

Mikrometeoritlerin atmosfere giriş derecesine ve hızına bağlı olarak kozmik taneler dokusal olarak da farklılıklar gösterirler. Bu nedenle mikrometeoritler dokusal farklılıklarına bağlı olarak üç ana sınıfa ayrılırlar (Şekil 5 [5, 12]).

Ergimemiş mikrometeoritler: Ergimemiş mikrometeoritler, mikron büyüklüğünde mineral tanelerinden oluşan ince taneli gözenekli bir yer kütlelerinin hakim olduğu ve kondritik göktaşlarının ince taneli matrislerine benzer olanlardır.

Yarı ergimiş mikrometeoritler: Scoriaceous mikrometeoritler olarak da adlandırılırlar düzensiz ve oldukça vesiküler (boşluklu) parçacıklardır.

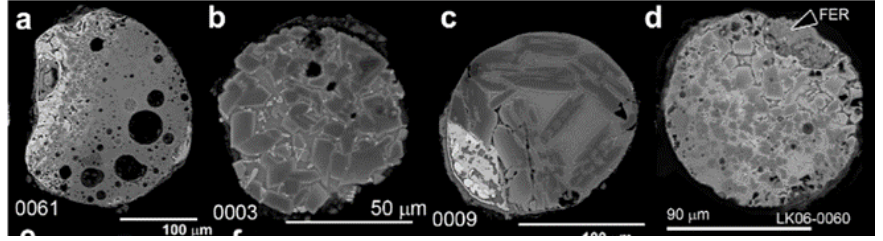


Şekil 4. Kriptokristalen olivin tanecikleri (a), camsı olivine küreleri (b). (URL-4)

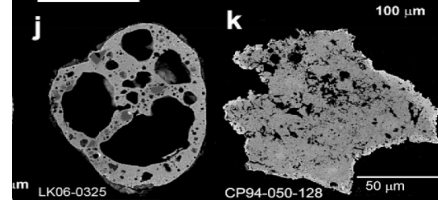
Ergimiş mikrometeoritler (Kozmik Küreler): Ergimiş mikrometeoritler, atmosferik giriş sırasında ergimiş damlacıklar olarak oluşan küresel ila yarı küresel parçacıklar olarak sınıflandırılır.

Kozmik küreler de kimyasal ve dokusal farklılıklarına göre kendi içerisinde farklı sınıflara ayrılır.

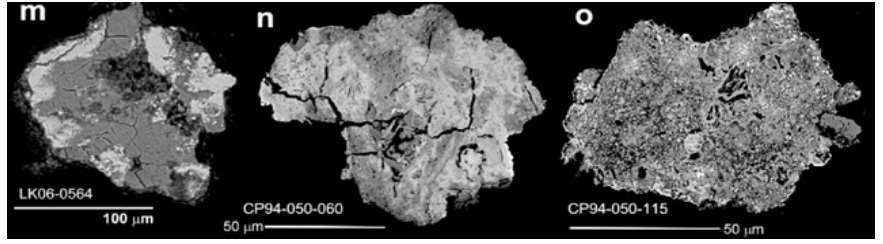
Ergimiş
MM



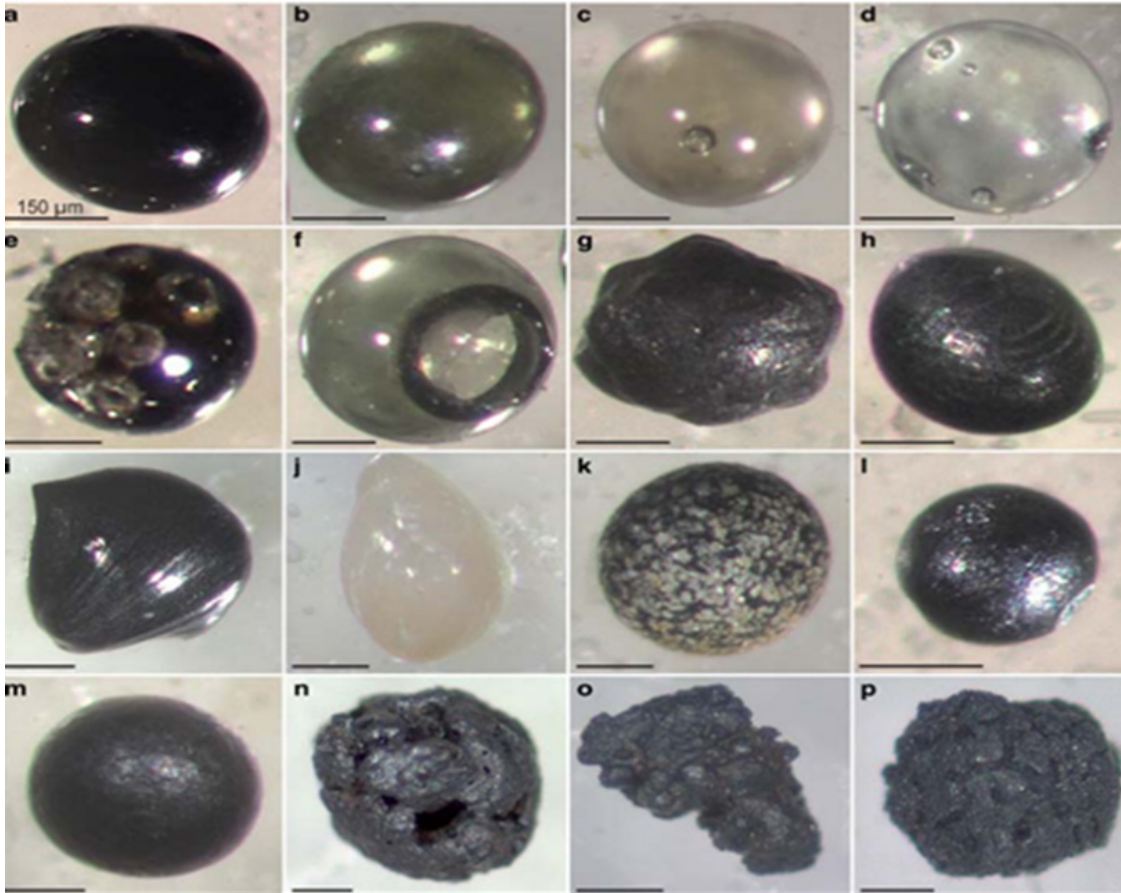
Yarı ergimiş
MM



Ergimemiş
MM



Şekil 5. Atmosfere giriş hızına bağlı olarak mikrometeoritlerin SEM görüntüleri [3,15]



Şekil 6. Camsı kozmik küreler (a-f), kriptokristalin kozmik küre ve karakteristik kaplumbağa kabuğu görünüşü (g), kuşaklı olivin (h-i), karakteristik süt beyaz rengiyle CAT kozmik küre (j), porfiritik kozmik küre (k), karakteristik metalik rengi ile I tip kozmik küre (l), G tip kozmik küre (m), bolluklu yapısı ile yarı ergimiş mikrometeorit (n), karakteristik şekilleri ile ergimemiş mikrometeoritler (o-p) [16].

maktadır (Şekil 6 [12, 13, 14, 16]). Bunlar:

S tip (Silikat küreler)

G tip (Ara form)

I tip (Demirli Küreler)

Mikrometeoritlerin bizlere ne tür faydaları var?

Aynı meteoritler gibi geldikleri yerler hakkında bilgi sahibi olmamıza olanak sağlarlar. Mesela Ay'dan, Mars'tan, Asteroit Kuşağı'ndan düşen mikrometeoritler galaksimiz içindeki katı kütleler hakkında bilgi edinmemize yardımcı olabilirler. Uygun izotop çalışmalarla düştüğü dönemin atmosferik koşulları hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlayabilirler. Bunun yanında galaksimiz dışından gelen kuyruklu yıldızlar hakkında da bilgi edinmemize yardımcı olabilirler. Aynı zamanda mikrometeoritler, meteoritlere göre daha bol bulunurlar. Bu nedenle mikrometeorit araştırmacılığı son derece önemli ve çalışılmaya değer bir konudur.

Kaynakça

- [1] Love S. G. ve Brownlee D. E. A direct measurement of the terrestrial mass accretion rate of cosmic dust. *Science*. 262, 550-553, 1993.
- [2] Rubin A. E. ve Grossman J. N., Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions. *Meteoritics & Planetary Science* 45, Nr 1, 114-122, 2010.
- [3] Genge M. J., Engrand C., Gounelle M. ve Taylor S. The classification of micrometeorites. *Meteoritics & Planetary Science* 43, Nr 3, 497-515, 2008.
- [4] Murray J. ve Renard A. F. Mineral Substances of Terrestrial and Extraterrestrial Origin in Deep-sea Deposits. Chapter 5 in: Report of the Scientific Results of the Voyage of H.M.S., 1891.
- [5] M. Maurette, C. Olinger, M. Christophe Michel-Levy, G. Kurat, M. Pourchet, F. Brandstätter & M. Bourrot-Denise. A collection of diverse micrometeorites recovered from 100 tonnes of Antarctic blue ice. *Nature* 351, pages 44-47, 1991.
- [6] Duprat J., Engrand C., Maurette M., Kurat G., Gounelle M. ve Hammer C. Micrometeorites from Central Antarctic snow: The CONCORDIA collection. *Advances in Space Research* 39, 605-611, 2007.
- [7] Badjukov D. D., Brandstätter F., Raitala J. ve Kurat G. Basaltic micrometeorites from the Novaya Zemlya glacier. *Meteoritics & Planetary Science*, 45, Nr 9, 1502-1512, 2010.
- [8] Akulov N. I., Pavlov L. A., Antipin E. V. Geochemical Peculiarities of Micrometeorites in Bottom Sediments of Lake Baikal. *Doklady Earth Sciences*, 454, Part 2, 193-198, 2014.
- [9] Gounelle M., Engrand C., Maurette M., Kurat G., McKeegan K. D. ve Brandstätter F. Small Antarctic Micrometeorites: A Mineralogical and In Situ Oxygen Isotope Study. *Meteoritics & Planetary Science* 40, Nr 6 917-932, 2005.
- [10] Herzog G. F., Xue S., Hall G. S., Nyquist L. E., Shih C. Y., Wiesmann H. ve Brownlee D. E. Isotopic and Elemental Composition of Iron, Nickel, And Chromium In Type I Deep-Sea Spherules: Implications For Origin And Composition of The Parent Micrometeoroids. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 63, 1443-1457, 1999.
- [11] Taylor S., Alexander C. M. O'D., Delaney J., Ma P., Herzog G. F. ve Engrand C. Isotopic fractionation of iron, potassium, and oxygen in stony cosmic spherules: Implications for heating histories and sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69, 2647-2662, 2005.
- [12] Taylor S., Lever J. H., ve Harvey R. P. Numbers, types and compositions of an unbiased collection of cosmic spherules. *Meteoritics & Planetary Science*, 35, 651-666, 2000.
- [13] Blanchard M. B., Brownlee D. E., Bunch T. E., Hodge P. W. ve Kyte F. T. Meteoroid ablation spheres from deep sea sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 46, 178-90, 1980.
- [14] Brownlee D. E., Bates B., ve Schramm L. The elemental composition of stony cosmic spherules. *Meteor. Planet. Sci.* 32, 157-175, 1997.
- [15] Kurat G., Koeberl C., Presper T., Brandstätter F. ve Maurette M. Petrology and Geochemistry of Antarctic Micrometeorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 3879-3904, 1994.
- [16] Folco L. Ve Cordier C. Micrometeorites. *EMU Notes in Mineralogy*, Vol. 15 (2015), Chapter 9, 253-297.
URL-1 <https://www.newscientist.com>
URL-2 <https://www.bellmuseum.umn.edu/blog/city-star-dust-micrometeorites/>
URL-3 <https://hackaday.com/2019/08/21/fantastic-micrometeorites-and-where-to-find-them/>
URL-4 <https://www.micrometeorites.org/galerie>

Mavi Gezegem



tmmobjmo



tmmobjmo



jeolojimuhendisleriodasi



tmmob-jeoloji-muhendisleri-odasi



www.youtube.com/c/JeolojiMuhendisleriOdasi



**TMMOB
JEOLJİ MÜHENDİSLERİ ODASI**

Meşrutiyet Cad. Hatay Sokak No. 21 Kocatepe/ANKARA

Tel: (+90) 312 432 30 85

Faks:(+90) 312 434 23 88

www.jmo.org.tr

e-posta: jmo@jmo.org.tr