



# 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

**G**ezegenimizin, 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 çıkarabiliyorlar.

### Permafrost nedir?

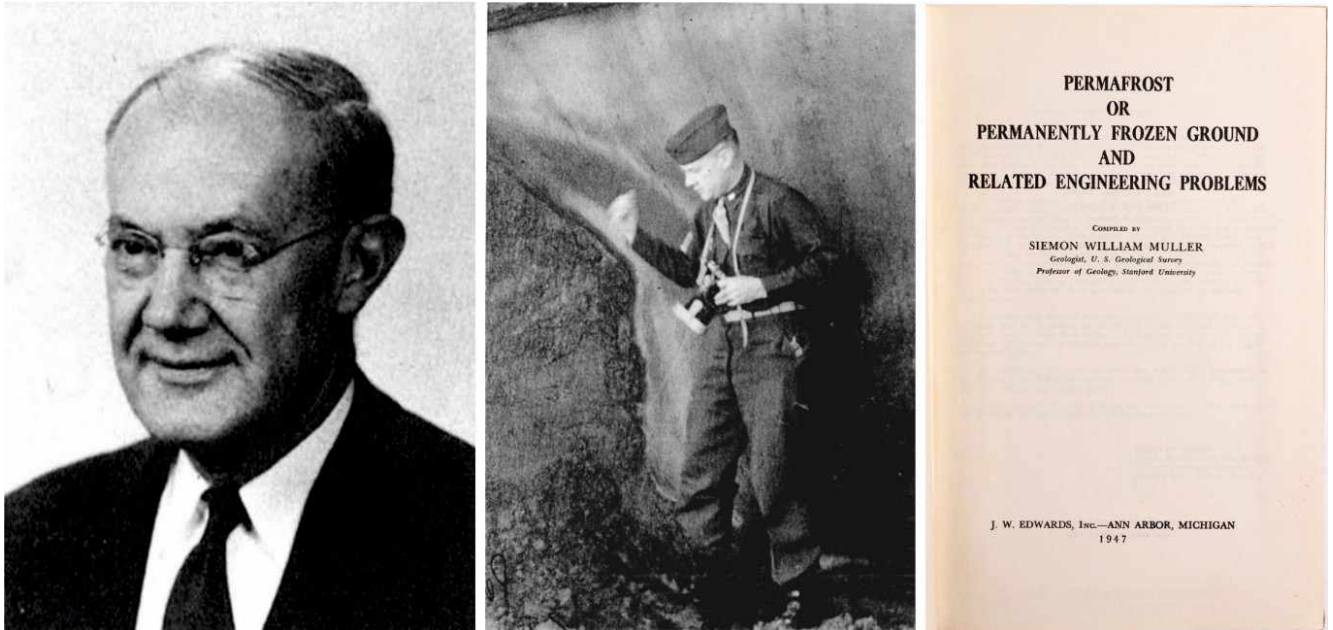
Permafrost veya daimi donmuş zemin birbirini izleyen en az iki yıl boyunca donmuş halde kalabilen toprak, sediman veya kaya zeminleri ifade ederler. Ancak, gezegenimizdeki oluşumlarının çoğu bundan çok daha eskidir ve eski buzullaşma dönemlerinden süregelirler [1]. 'Daimi donmuş zemin' olarak uzun zamandır 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.

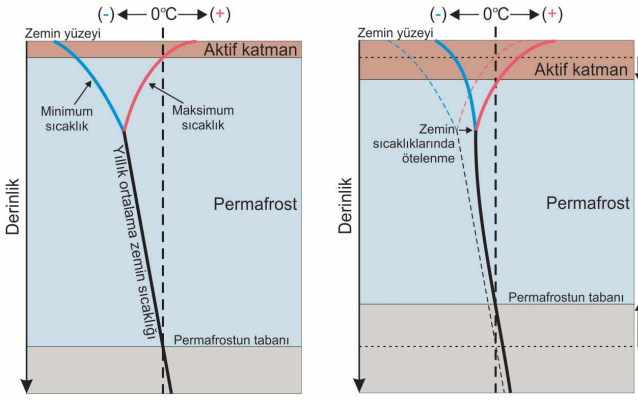
Esas itibariyle permafrostun bünyesinde donuk olduğunu yansıtacak nem/buz olmasına gerek yoktur. Sıcaklığa dayalı bir tanımı olmasından ötürü 0° C ve altında sıcaklığa sahip derinlikte bir zemin olması bu ortam için yeterlidir. Permafrostun yeryüzünden itibaren mevsimsel olarak çözülen maksimum derinliğine 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 Yarım Küre'nin %15 ila %24'lük bir kesimini kaplamaktadır [5, 6]. Permafrost kalınlığı ise birkaç desimetre ile 1,5 kilometre arasında değişmektedir. Kuzey Yarım Küre'de özellik-



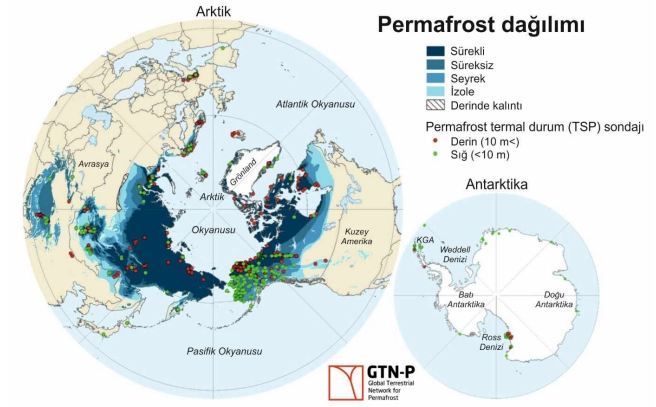
**Şekil 1.** Amerikalı jeolog Siemon William Muller (1900-1970), ortada Muller tahminen 1944 yılında permafrost yüzleği önünde ve sağda Muller'in ilk olarak 1943 yılında basılan permafrost ve ilişkili mühendislik problemleri raporunun 1947'deki kitap baskısı.



**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 de 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].

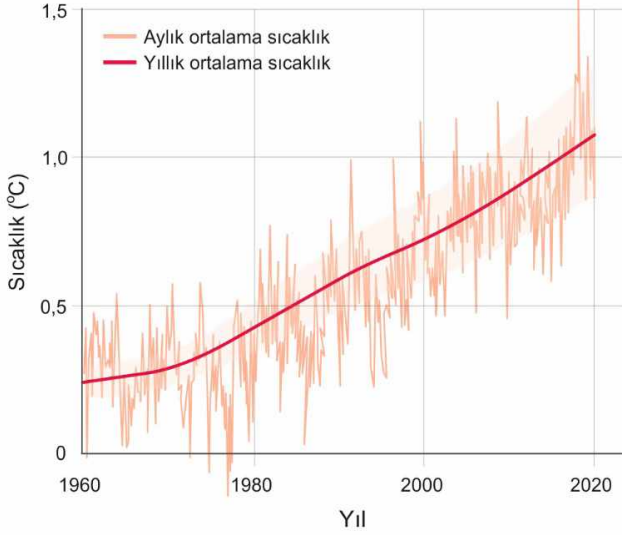
Gerek Kuzey gerekse de Güney Yarım Küre'de yapılan ve sayıları her geçen gün artan permafrost izleme çalışmaları, permafrost arazilerin üstünü örten aktif katman kalınlıklarının hızla arttığına, yani altlarındaki permafrostun çözülmesine işaret etmekte, bu da yerküre üzerindeki dağılımlarını ciddi manada 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 km<sup>2</sup> olan Hindistan'ın büyüklüğünden biraz daha büyük bir alanda permafrost kaybına neden olurken, 2°C'lik bir artış ise gezegenimizdeki permafrostun %40'ünün 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)



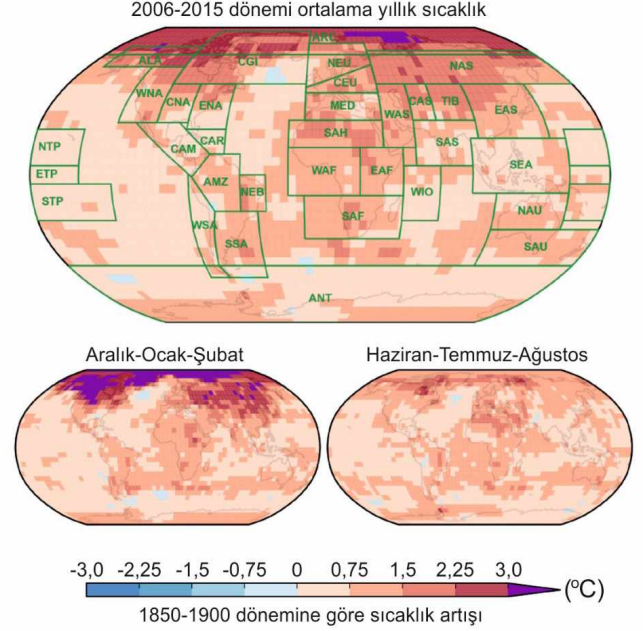
**Şekil 4.** 1950-2020 yılları arası gözlemlenen aylık (turuncu çizgi) ve yıllık (kırmızı çizgi) küresel ortalama yüzey sıcaklıklarının 1850-1900 dönemine göre değişimi ([12]'den değiştirilerek alınmıştır).



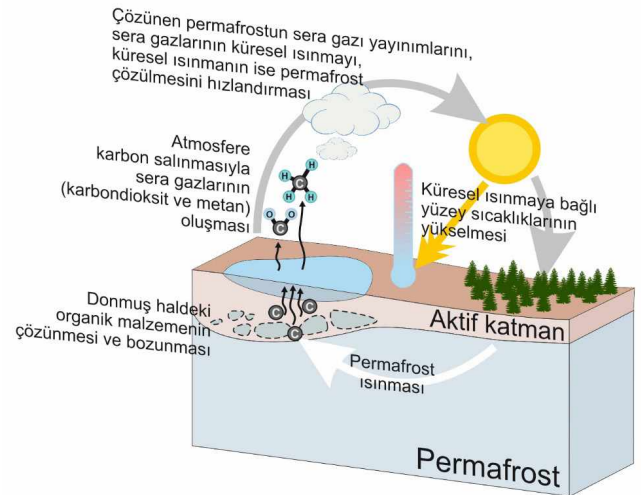
**Şekil 5.** İklim ve zemin ısınmasından ötürü permafrostun çözülmeye uğrayarak üst kesimlerinde aktif katmanın mevsimsel olarak donmuş bir katmana, onun altında ise talik oluşumlarına dönüşmesi ([14]'ten değiştirilerek çizilmiştir). Üst kesimlerde bu şekilde bir değişim olsa da daha derinlerde permafrost 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 CO<sub>2</sub> hem de CH<sub>4</sub> 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.

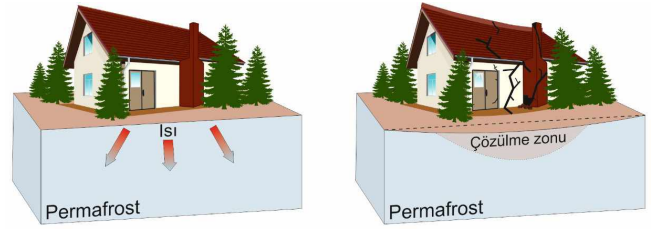


**Şekil 7.** Permafrost çözülmesi ve küresel ısınma arasındaki geri besleme döngüsü (Birleşmiş Milletler Çevre Programı verilerine göre Woods Hole Araştırma Merkezi tarafından hazırlanan şekilden değiştirilerek çizilmiştir).

## 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.

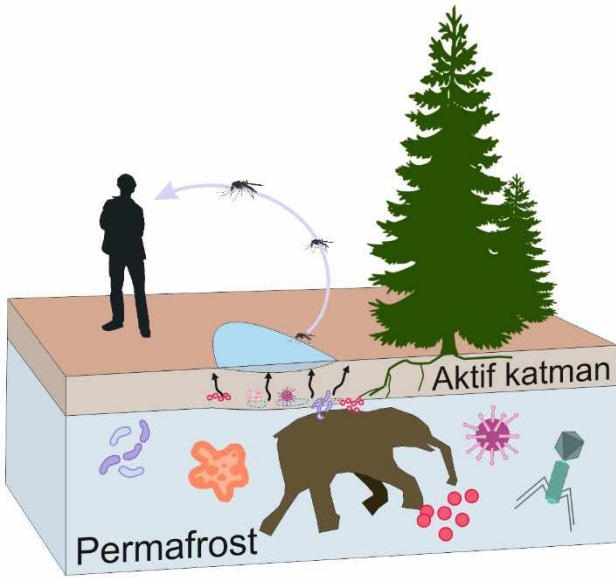
Yukarıda da değinildiği gibi jeolog Siemon Muller'in permafrost kelimesini önermesini sağlayan dönemde Alaska bölgesi başta olmak üzere Arktik'te askeri amaçlı üst ve altyapıların permafrost varlığından ötürü karşılaştığı mühendislik problemlerin anlaşılması amaçlanıyordu. İkinci Dünya Savaşı dönemine 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 karmaşıktır 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.

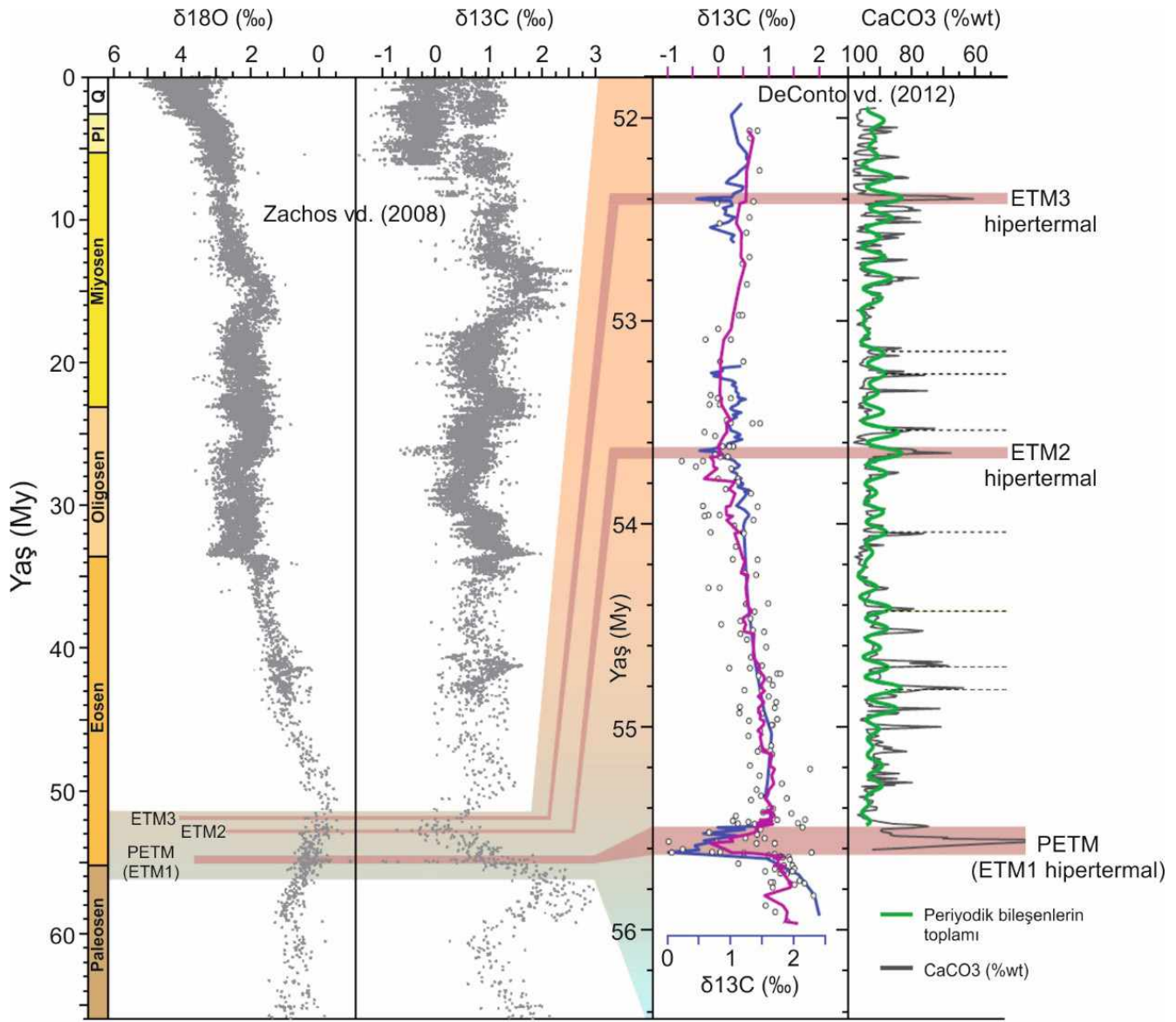


**Şekil 9.** Permafrost çözülmesiyle potansiyel patojenlerin ortaya çıkışı ve insan ve çevreye ulaşması (Wu vd. 2022'den esinlenerek çizilmiştir).

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 CaCO<sub>3</sub> 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.