

BUZUL DÖNEMLERİNİ HAZIRLAYAN ETKENLER

Dünya'nın iklimi değişiyor mu? Hemen hemen herkesin bu konuya ilişkin çeşitli iddialarını yarı-mera basıldığı son günlerde, bilim adamları dünyanın son bir milyon yılda geçirdiği iklim değişimlerini ortaya koyarak, gelecekteki iklimi ilişkin varsayımlarda bulunuyorlar.

Patagonya (Arjantin)'da derin bir gölde sona eren bir buzul örtüsü. Buzul dönemlerinde ilerleyen buzullar önde görülen ağaçların üzerinden aşmış, buzullar gerilediğinde, ağaçlar yeniden kök salmıştır. Bu bitkilerde yapılan radyo karbon yaşlandırılmaları, Güney Yarımküre'deki buzulların hareketinin, Kuzey Yarımküre'yle aynı zamanda olduğunu ortaya çıkarıyor.

Dünyanın iklim dengesi son bir milyon yıl içerisinde, kuzey enlemlerinde ve dağlarda, karların birikip, yeniden erimesine yol açacak şekilde sıkı sıkıya bozulup yeniden kuruldu. Yağan kar, sıkışarak buza dönüştü; dağlardaki buzul dilleri ve

buzul örtülerini oluşturdu. Onbinlerce yıllık zaman süresince büyüyerek birkaç kilometre kalınlığa ulaşan buzullar, Avrupa'nın ve ABD'nin ortalarına dek yayılarak yeryüzü üzerinde çeşitli aşınım ve birikim şekilleri oluşturdular. Her buzul dönemi anı bir bi-

çimde sonlandı. Buz örtüleri, birkaç bin yıl içinde hızla eriyerek yeniden bugünkü sınırlarına çekildiler.

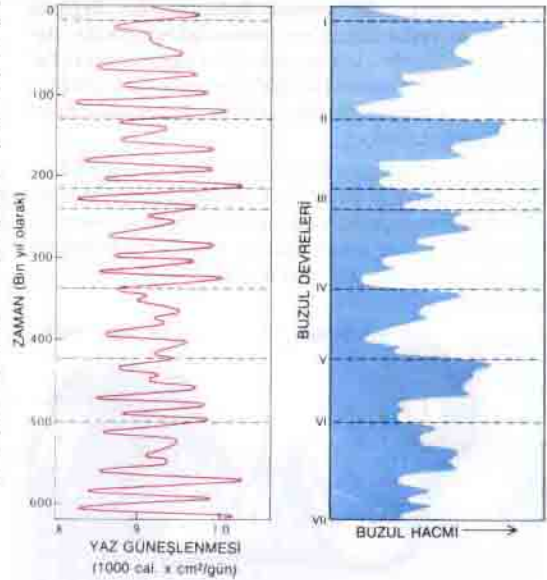
Son 30 yılda yapılan araştırmalar, buzul dönemlerine astronomik etkenlerin yol açtığını ortaya koymaktadır. Dünyanın yörüngesindeki uzun dönemli periyodik değişimlerle, dönme eksenindeki eğikliğinin artıp azalması şeklindeki daha kısa devirli topaç hareketi, mevsimlerin şiddetini etkileyerek buzulların genişleyip daralmasına yol açmaktadır. Kısacası, astronomik devirsellikler, tetkik görevini yüklenmekte, aradan buharlaşma ve yağış dengesi ile mevsim şiddeti değişmekte, bu değişiklikler okyanus-atmosfer ilişkisini başka bir modele dönüştürmekte, okyanus dolaşımı değişmekte, böylece ısı dünya üzerinde farklı bir şekilde dağılmakta, atmosferin özellikleri başkalaşmakta, iklim değişmekte ve sonuçta buzul örtüleri büyümekte ya da küçülmektedir.

İsviçreli doğa bilimcisi *Louis Agassiz*, 1842 yılında, Alp Dağları'ndaki cilâlanmış ve çizilmiş kayalar ve moloz yığıntılarının eskiden hüküm sürmüş buzulların marifeti olduğuna ilk kez dikkati çekti. Aynı yıl Fransız *Joseph A. Adhemar*, mevsimlerin şiddetini yönlendiren astronomik kökenli değişikliklerin, periyodik bir şekilde buzullaşmaya da yol açmış olabileceğini savundu.

ASTRONOMİK ETKENLER

Yugoslav astronom *Milutin Milankovitch*, bu varsayımı, 1920 ve 1930'larda formüle dönüştürdü. Ona göre astronomik nedenin üç bileşeni bulunuyor. Bunlardan ikisi, mevsimlerin şiddetini değiştirmekte, üçüncüsü ise, iki bileşen arasındaki etkileşimi sağlamaktadır.

Mevsimselliği kontrol eden ilk etken, dünyanın dönme eksenindeki eğikliğidir. Günümüzde düşeyle 23,5 derecelik bir açı yapan bu eksen, 41.000 yılda bir, 21,5 dereceden 24,5 dereceye devrimsel olarak değişmektedir. Eğiklik arttıkça her iki yarımkürede mevsimlerin şiddeti de artmaktadır. Yani, yazlar daha sıcak, kışlar daha soğuk olmaktadır. Mevsimselliği daha zayıf olarak kontrol eden ikinci etken, Dünya'nın yörüngesiyle ilgilidir. Her 100.000 yıllık süre içerisinde, Dünya'nın Güneş çevresindeki yörüngesi daha basık bir elips şeklinden, daha dairesel bir elipse değişip durmaktadır. Elipslik arttıkça yörüngenin en yakın ve en uzak noktalarında Dünya'nın Güneş'e olan mesafeleri arasındaki fark artmakta, bu durum, bir yarımkürede mevsimlerin şiddetinin artmasına, diğer yarımkürede azalmasına neden olmaktadır. Günümüzde Güney Yarımküre'deki kış mevsimi döneminde, Dünya Güneş'e göre en uzak mesafede bulunmakta, bunun sonucunda Güney Kutbu'nun kışları kuzeyden biraz daha soğuk, yazları ise biraz daha sıcak olmaktadır. Üçüncü astronomik etken, dünyanın eksenini ile yörüngesindeki değişikliklerin karşılıklı olarak birbirini etkilemesi olayıdır. Dünya her 23.000 yılda, diğer yıldızların arasında tam bir daire çizmektedir. Bu olay sırasında, dönme merkezinin eğiklik derecesinden kaynaklanan mevsim değişik-



Buzul dönemlerine yolaçan astronomik devirsellikler: 100.000 yılda tamamlanan dünyanın yörüngesine ilişkin değişim ve 41.000 yılda tamamlanan dönme eksenine ilişkin değişim (En üstte). Astronomik etkenlerin oluşturduğu, yaz güneşlenme şiddetinin zaman içinde değişimini gösteren eğri (kuzey enlemlerinde) (Solda). Dünyanın buzul hacmindeki değişimi gösteren eğri. Buzul hacmi 100.000 yıl içinde sürekli artış göstermekte, sonra aniden azalmaktadır. Buzul dönemlerinin bitişi yaz güneşlenmesinin kuzey enlemlerinde şiddetlendiği dönemlere rastlamaktadır (Sağda).

liğiyle yörünge uzaklığından kaynaklanan mevsim değişikliğinin birbirlerini kuvvetlendirmesi veya zayıflatması durumu ortaya çıkmaktadır. Mevsimselliğin bu iki denetçisi bir yarımkürede birbirini kuvvetlendirdiğinde, diğer yarımkürede zayıflamaktadır. *Milankovitch*'in hesaplarına göre bu üç etken, yaz aylarında kutba yakın enlemlerdeki güneşlenme derecesini % 20'ye varan ölçüde değiştirebilmektedir. Araştırmacıya göre bu oran, buzul örtülerinin oluşabilmesi için yeterlidir. Buzul dönemlerine ilişkin sistematik verilerin eksikliği nedeniyle, bu varsayım uzun süre kesinlik kazanmadı.

BUZUL KAYITLARI OKYANUS TABANINDAN GELİYOR

1950 yılları başlarında, Şikago Üniversitesi'nden *Cesare Emiliani* son dönem buzullaşmasının eksiksiz kayıtlarını çıkarmayı başardı. Şaşırtıcı olan husus, bu kayıtların deniz tabanı çökellerinden elde edilmiş olmasıdır. Bilindiği gibi, denizlerde yaşayan

Son buzul döneminde (19 500 yıl önce) her iki yarım kürede, buzul örtülerinin ve dağ buzullarının yayılışını gösteren harita. Kıta buzullarının kırmızı, deniz buzullarının sarı renkte görüldüğü haritada, kıta buzullarının bugünkü kıyı çizgisinin ilerisine taşması'nın nedeni, buzul döneminde deniz seviyesinin, bugünkünden daha aşağı seviyede bulunmasıdır. Sağdaki grafik Amerika Kıtası'nın batısındaki dağlarda, buzul dönemindeki kar sınırı (mavi) ve günümüzdeki kar sınırı (kırmızı) arasındaki 1000 metrelik farkı gösteriyor (kuzeyden güneye olan güzergah yandaki haritada işaretlenmiştir).

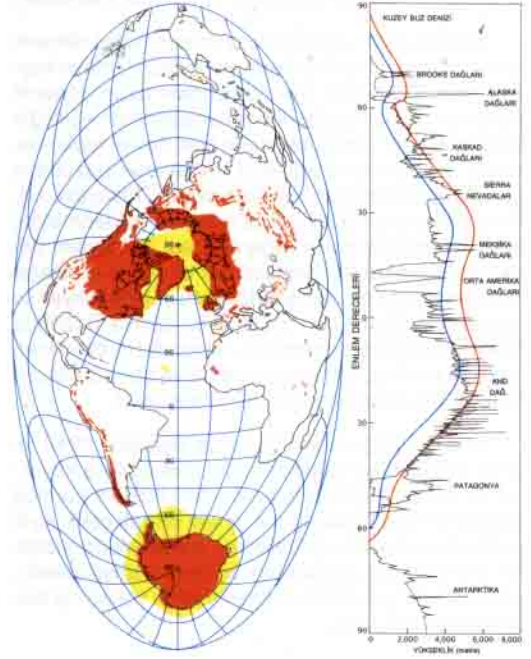
Atlas Okyanusu'nun kuzeyinde oluşarak diğer okyanusları dolaşan tuzlu derinlik akıntısı buzul dönemlerinde mevcut değildi (Akıntının yüzeye yakın bölümleri daha açık tonda gösterilmiştir. Mavi oklarla belirtilen kuşaklar ise sığ dönüş akıntılarını temsil etmektedir).



foraminifer adı verilen tek hücreli organizmalar, kalsiyum karbonattan oluşan bir kabuğa sahiptir. Canlı öldüğünde, bu kabuk dişe çökerek deniz tabanı çökeltilerini oluşturur. İçinç oları, kabuğu oluşturan kirecin, canlılığın içinde yaşadığı deniz suyunun bazı özelliklerini taşımasıdır. Örneğin, oksijenin normal izotopu olan O^{16} 'ya oranı, foraminifer kabuğun oluşturduğu kireç içerisinde aynen korunur.

Adı geçen bu oksijen izotoplarının birbirine oranı ile, buzul olarak tutulan suyun, dünyadaki toplam su kütlelerine oranı arasında çok yakın bir ilişki olduğu kesin olarak ortaya çıkmıştır. Bu ilişkiyi, bir çeşit meteorolojik damıtma olayı sağlamaktadır. Şöyle ki: O^{18} izotopu içeren su molekülleri, O^{16} içerenlere göre daha çabuk yoğunlaşarak yağışa dönüşmeye eğilimlidir. Bu nedenle sıcak okyanuslardan buharlaşan su buharı, kaynağından uzaklaştığında, önce O^{18} izotopu yağış halinde yeniden okyanusa dönecektir. Kaynaktan en uzakta yer alan buzul örtüleri ve dağ buzulları üzerine yağın kar ise, göreceli olarak O^{18} yönünden daha fakir olacaktır. O^{17} 'ce fakir olan buzulların miktarı arttıkça okyanuslarda O^{18} yönünde zenginleşecektir. Kısacası, buzul örtülerinin genişlediği dönemlerde deniz suyundaki ve dolayısıyla deniz tabanındaki çökeltilerde O^{18} 'in oranı artacaktır.

Emiliani, deniz tabanından sondajla elde edilen çökeltileri incelediğinde, O^{18} - O^{16} oranının birbirine oranının Milankovitch'in öne sürdüğü dönemlere uyumlu



olarak yükselip alçaldığını gördü. Bunun üzerine yüzlerce karotta aynı işlem tekrarlandı. Sonunda izotop oranı değişimine ilişkin kayıtların Dünya'nın yörüngesiyle ilgili değişimlerle aynı devrimselliklerini yansıttığı, 1976 yılında kesin olarak anlaşıldı.

Elde edilen verilere göre, son 800.000 yıl içinde, Dünya'nın yörüngesindeki değişikliklere bağlı olarak buzulların her 100.000 yılda dünya ölçeğinde genişlediği anlaşılmıştır. Ayrıca, 100.000 yıllık bu uzun devreler içerisinde gözlenen 23.000 ve 41.000 yıllık devreler halindeki daha küçük çaptaki buzul salınımlarının dünya eksenindeki eğikliğinin periyodik değişimine denk geldiği de kanıtlanmıştır.

Şekilde görüldüğü gibi, buzul hacminin değişimini veren eğri, testere dişi gibi keskin sınırlar gösterdiği halde, mevsimselliğin değişimini yansıtan eğride, devreler arası daha az belirgindir. Öte yandan 100.000 yıllık devrimsellik mevsimlere göre güneşlenmenin değişimini gösteren eğride fazla belirgin olmadığı halde, buzullaşma eğrisinde, ana buzullaşmayı verecek şekilde belirgindir. Bu sonuçlar, buzulların 100.000 yıllık süre içerisinde arada küçük salınımlar yapmakla beraber, sürekli bir biçimde genişlediğini, daha sonra birkaç bin yıl içerisinde aniden küçülerek eski sınırlarına çekildiğini gösteriyor.

Araştırmacılar buzul kütlelerinin ağırlığı altında çöken yerkabuğunun tepkisini de açıkladılar. Toronto Üniversitesi'nden William R. Peltier ve William T. Hayde geliştirdikleri kuramsal modelde, buzul örtüsünün yaklaşık 100.000 yılda kritik hacime ulaştığını, bu noktada, kabuğun altındaki plastik mantonun hızla

akarak yer deđiřtirdiđini ve űstte bulunan kabuđun okerek bu bořluđu doldurduđunu savundular. okme sonunda, kayaçlar űzerinde yer alan buzul rtűsű, daha dűřűk seviyelere indiđi için ısınmakta ve űiddetli kuzey yazlarıyla hızla erimektedir.

Son buzul döneminde, mevsimselliđin űiddeti kuzey ve gűneyde çok farklı olduđu halde, iklimin her iki yarımkűrede aynı zamanda deđiřtiđini ortaya koyan pek çok kanıt vardır. Buzulların kayaçları ařın-dırma, tařıma ve biriktirmesiyle oluřturduđu *moren* denilen okellerin arařtırılmasıyla, dađ buzullarının son buzul döneminde enlem farkı gözetmeksizin Kuzey Yarımkűre'de Kafkaslar, Alpler ve Himalayalar; tropik kuřakta Yeni Gine, Hawai, Kolombiya ve Dođu Afrika; Gűney Yarımkűre'de Sili, Tasmanya ve Yeni Zelanda'da aynı zamanda geliřtiđi ortaya ıktı.

Bugűne dek çalıřılan tűm dađlarda, cođrafik konumu ve yađıř karakterine bađlı olmaksızın son buzul döneminde kar sınırının bugűnkűne göre yaklařık bir kilometre daha alçak, hava sıcaklıđının ise, yaklařık beř derece daha dűřűk olduđu belirlenmiřtir. Moren depoları içerisinde bulunan organik maddelerde yapılan radyometrik yařlandırmalar, dađ buzullarının Kuzey Yarımkűre'nin rtű buzullarıyla aynı zamanda bűyűyűp kűldűđűnű ve gűnűműzden önce yaklařık 19.500-14.000 yılları arasındaki bir zaman aralıđında, en yaygın hale geldiđini ortaya koyuyor. 14.000 yıl önce, rtű buzullarının gerilemeye bařlamasıyla birlikte, dađ buzulları da kısılmaya bařladı. Ancak, rtű buzullarının bugűnkű sınırlarına çekilmesi, yaklařık 7000 yıl sűrdűđű halde, dađ buzulları daha kısa sűrede çekildi. Grönland ve Antarktika'daki buzul rtűlerine iliřkin yapılan çalıřmalar, son buzul döneminde, her iki kutbun da gűnűműze göre 10 derece daha sođuk olduđunu, daha sonra yavař yavař ısındıđını ortaya koyuyor.

Nasıl oluyor da mevsim űiddetliliđini farklı yařayan iki yarımkűrede, buzulların hareketi eřgűdűmlű bir özellik gösteriyor? Bu sorunun cevabını okyanus-atmosfer sisteminin deđiřiminde aramak gerekiyor.

OKYANUS-ATMOSFER SİSTEMİ DEĐİŐİŐOR

Kutuplardaki eski buzulların içerdiđi hava kabarcıklarının incelenmesi sonucunda, son buzul döneminde havadaki CO₂ oranının bugűnkűnűn 2/3'si oranında olduđu anlařıldı. Sadece okyanus sirkűlasyonundaki bűyűk bir deđiřim atmosfer bileřimini bu lde deđiřtirebilir. nkű okyanuslar, atmosferden 60 kez daha çok CO₂ tutmaktadır. Denizlerin yűzey sularında yařayan canlılar, CO₂'i yűzeyden derinlere ileten biyolojik bir pompa iřlevini sűrdűrler. Bu olayın etkinliđi, yűzey topluluklarının tűrleri ve popűlasyonlarıyla, dűzey yöndeki karıřıma bađlıdır. Buzul dönemlerinde ekolojik deđiřikliklerin, biyolojik pompalamayı daha etkili kıldıđı kesindir. Öte yandan okyanus sirkűlasyonunun, buzul dönemlerinde bugűnkűnden daha farklı olduđunun kanıtı, fo-

raminiferlerin içerdiđi kadmiyum oranının deđiřiminden çıkarılabilmektedir. Buna göre Atlas Okyanusu'nda bugűn var olan su sirkűlasyonu, son buzul dönemi-nde mevcut deđildi.

Öte yandan kutuplardaki buzulların içinde hapis kalan havanın bileřimi űzerinde yapılan arařtırmalar, buzul dönemlerinde atmosferdeki toz oranının buzlararası dönemden 30 kat fazla, metan oranının ise bugűnkűnűn yarı kadar olduđunu ortaya ıktı. Bu sonuç, atmosferin buzul dönemlerinde çok daha tozlu olduđunu gösteriyor. Toz taneleri, gűneř ışınlarını yansıtarak, havanın sođumasına bir lde yardımcı oldular. Dűřűk oranda metan içeren çok tozlu atmosfer, buzul dönemlerinde iklimin gűnűműzden daha kurak olduđunu ele veriyor. Toz, bitki rtűsűnűn yetersiz olduđu durumlarda artar, metan ise bataklıklarda űrer. Bu kuraklık kořulları, ısının dűnya ölçeđinde deđiřimini de etkilemiř olabilir. Örneđin, kurak kořullarda, yűkseklige bađlı ısı azalmaları daha da űiddetlenir. Bu kuralın, buzul dönemlerinde dađ buzullarının bűyűmesine katkı sađladıđı tahmin ediliyor.

Daha önce denildiđi gibi, 100.000 yıllık astronomik devirsellik mevsim űiddeti deđiřimini yansıtan eđri űzerinde 41.000 ve 23.000 yıllık devirselliklere göre daha fazla zayıf korelasyon gösterdiđi halde, buzul dönemlerini yansıtan eđri űzerinde daha belirleyici bir durumdur. Belki de, buzul rtűlerinin geniřlemesi, atmosfer sirkűlasyonu űzerinde bir geri besleme (feed back) etkisi yapmakta ve okyanus-atmosfer sistemi, buzul rtűlerinin kritik bűyűklűge ulařtıđı 100.000 yılda en hassas bir konuma gelmektedir.

Özetle vurgulamak gerekirse, buzul dönemlerinden buzularası dönemlerine geçiř, birbirinden tamamen farklı, ancak sabit iki ayrı okyanus-atmosfer iřleyiř modelini yansıtmaktadır. Son buzul döneminin biřimindeki olaylar bu durumu yeterince açıklamaktadır: Kuzey Atlantik'in yűzey suları ısınmıř, Kuzey Yarımkűre'deki rtű buzullarıyla Gűney Yarımkűre'deki dađ buzulları erimiř, Avrupa'da ađaçlar yeniden ortaya çıkmıř, Antarktika çevresinde ve Gűney in Denizi'nde plankton ekolojisi deđiřmiř ve tűm bu olaylar gűnűműzden önceki 14.000-13.000 yılları arasındaki kısa bir zaman içerisinde gerçekleřmiřtir. Kuzey Yarımkűre, bařlangıçta astronomik etkilerle űiddetli yazların etkisini girmiř, daha sonra bu durum, dűnyamızın tamamı için geçerli olan yeni bir iklim modeline yol açmıřtır.

İklim bilimciler, iřte bu nedenle dűnyamızın gelecekteki iklimine iliřkin kaygılar tařıyorlar. Bilindiđi gibi, insanođunun etkinliđi sonucu, atmosfere karıřan karbondioksit ve diđer sera gazlarının oranı, bűyűk lde artmaktadır. Acaba bu olay tetik görevi yaparak, dűnyamızın bugűnkűnden çok farklı yeni bir iklim modeline sűrűkleyemez mi?

Wallace S. Broecker ve
George H. Denton'dan kısaltarak ev.:
Dr.F. Sancar OZANER