



TERMOHALİN DOLAŞIM NEDİR?

Veryüzünde iklim koşulları sadece atmosfere değil, aynı zamanda atmosfer ile okyanuslar arasındaki karşılıklı etkileşime bağlı. Bugün okyanus ile atmosfer arasındaki ilişkinin bilinen en iyi örnekleri El Nino-Güneyli Salınımı (ENSO) ile Kuzey Atlantik Salınımı (NAO). Son yıllarda yapılan araştırmalar, okyanusların yüzey sularının yanı sıra derinlerde meydana gelen su dolaşımının da dünyanın enerji bilançosu, dolayısıyla dünyanın sıcaklık dengesi üzerinde belirleyici olduğunu göstermiş bulunuyor.

Okyanuslarda yüzey suları rüzgarlarca yönlendirilirken, derin (dip) sularındaki dolaşım, yoğunluk farklarına göre şekillenir. Deniz sularının yoğunluğu sıcaklık, tuzluluk ve basınca bağ-

lı olarak değişiklikler gösterir. Sıcaklık azaldıkça veya tuzluluk ve basınç arttıkça sular daha yoğun olur ve derinlere doğru iner. Yoğunluğu az olan sıcak sularsa, yüzeyde kalır. Bu nedenle, tropikal ve subtropikal bölgelerdeki sıcak, düşük yoğunluktaki okyanus suları yüzeyden yüksek enlemlere doğru yayılırken buharlaşma ve soğuk havayla temas sonucu enerji kaybederek soğur, yoğunlaşır ve okyanusların derinlerinden ekvatora doğru hareket eder. Okyanuslarda tuzluluk ve sıcaklık farklarının yarattığı bu dolaşıma termohalin adı veriliyor.

Aslında okyanusların yüzeyinde daha çok rüzgar sistemlerine bağlı olarak gelişen dolaşımla, suların yoğunluk farklarından kaynaklanan termo-

halin dolaşım içiçe girmiş bir sistem oluşturur. Nitekim, Meksika Körfezi çevresinde, okyanusun yüzey sularının güneş radyasyonu ile ısınması ve buharlaşması sonucunda yaklaşık 800 m. derinliğinde ılık ve tuzlu bir su kütlesi oluşur. Gulf Stream-Kuzey Atlantik Akıntısı tarafından kuzey enlemlere doğru taşınan bu su kütlelerinin yoğunluğu, Norveç ve Grönland denizlerinde yüksek hızdaki rüzgarların yol açtığı buharlaşma, deniz buzlarının oluşumu ve havayla temas eden yüzey sularındaki soğuma sonucu iyice artar. Sıcaklığı 10°C den 2°C ye düşen deniz suyu, atmosfere çok büyük miktarda ısı enerjisi verir. Açığa çıkan enerji, yaklaşık bu enlemin bir yılda güneşten aldığı enerjinin % 30'una

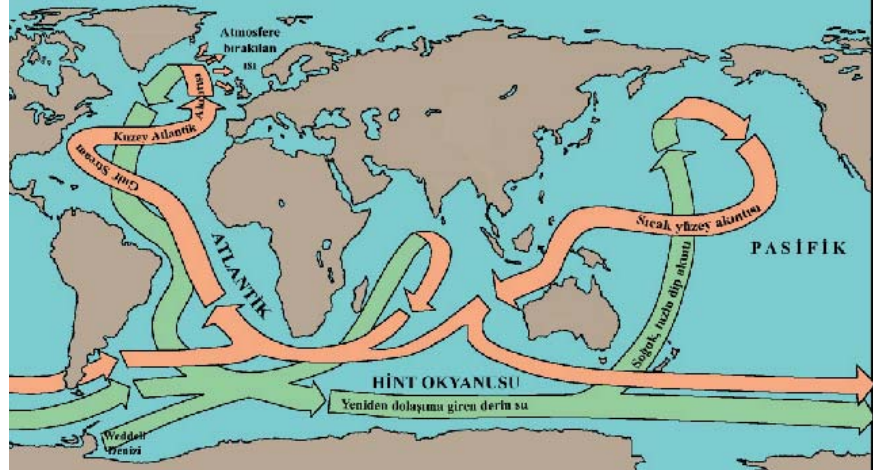
eşittir. Batı Avrupa'nın, bulunduğu enleme göre daha sıcak olmasının nedeni, daha güney enlemlerde sona eren Gulf Stream akıntısından çok bu olay ile ilgili.

Hacmi bütün dünyadaki akarsuların yıllık akımlarının yaklaşık 20 katı kadar olan bu yoğunluğu artmış su kütlesi, Kuzey Atlantik'te okyanusun dibine yönelerek güney enlemlere doğru dünyanın termohalin dolaşımını başlatır. Yavaş hareket eden bu su kütlesi 1500 m. den daha derinlerde akışını sürdürerek Güney Atlantik ve Antartika çevresinde özellikle Weddell Denizi'nde daha soğuk, tuzlu ve yoğun su kütlesi ile karışır. Bu taşıyıcı kuşak, dünyanın kendi etrafında dönüşünün yarattığı etki (Coriolis kuvveti) ile doğuya dönerek, bir kolu Hint Okyanusu'na, diğeri Avustralya kıtasının güneyinden Pasifik Okyanusu'na yönelir. Kuzey Atlantik'in derin sularında başlayan bu dolaşımın Kuzey Pasifik'e ulaşmasının 500 yıl aldığı tahmin edilmekte. Hint Okyanusu ve Pasifik'in derinliklerinde soğuk ve tuzlu suların daha sıcak su kütleleriyle karışması, bu alanlarda suların yüzeye yükselmesine ve daha az derinlikte bir akıntı sistemi ile tekrar Kuzey Atlantik'e yönelmesine yol açar. Okyanuslarda küresel ölçekteki termohalin dolaşımının yaklaşık 1000 yılda tamamlandığı hesaplanmış bulunuyor.

Termohalin Dolaşımındaki Değişiklikler

Günümüzde Antarktika ve Grönland'da yapılan buzul sondajlarından alınan örnekler, geçmişte yaşanan kısa süreli iklim oynamalarının termohalin dolaşım ile yakından ilişkili olduğunu göstermekte. Buzullardan alınan örneklerdeki oksijen izotop oranları, binlerce yıl önceye ait hava sıcaklıklarını hesaplamayı mümkün kılar. Bu sayede buzul ve buzularası çağlara geçiş koşulları ve paleoklimatik değişimler ortaya konulur.

Buzul çağlarını başlatan esas nedenin dünyanın yörüngesindeki değişikliklere bağlı olarak güneşten alınan enerji miktarındaki değişimler olduğu bilinmektedir. Ancak buzul ve buzularası çağlara geçişler sıcak ve soğuk iklim



Okyanuslarda termohalin dolaşım. Yüzey suları (kavuniçi renk) büyük rüzgar sistemleri tarafından yönlendirilirken, derin sulardaki dolaşım (yeşil renk) sıcaklık ve tuzluluğa bağlı yoğunluk farklarına göre şekillenmektedir.

lim salınımları ile gerçekleşmektedir. Grönland'dan alınan örnekler, bu iklim oynamaları sırasında (Dansgaard/Oeschger olayları) ortalama sıcaklıklarda 5-6 °C'yi bulan değişimler olduğunu, bu olayda Kuzey Atlantik'te başlayan termohalin dolaşımın da rolü bulunduğunu gösteriyor.

Bunun en iyi örneği, son buzul çağı sonlarında, buzulların gerilemeye başladığı yıllarda gerçekleşen ve Younger Dryas olarak bilinen iklimik olaydır. Günümüzden yaklaşık 14.700-13.000 yıl önce, son buzul çağına ait buzullar gerilemeye ve sıcaklıklar yükselmeye başladı. Ancak 12.900 yıl önce, sıcaklıklar azalmış ve bunun sonucunda Kuzey Avrupa ve Amerika'nın kuzeydoğusu tekrar buzullarla kaplandı. Polen analizleri, bu dönemde soğuyan Avrupa'nın "Dryas" gibi arktik çayırlar ile kaplandığını ortaya koymakta. Buzul sondajı örnekleriyle, günümüzden 12.900 ile 11.600 arasındaki dönemde, ortalama sıcaklığın Avrupa ve Amerika'nın kuzeyinde 6 °C düştüğünü, yaklaşık 1000 yıl devam eden bu soğuk dönemin sonunda, sıcaklıkların tekrar artma eğilimi gösterdiğini düşündürüyor.

Derin okyanus sondajlarından alınan örnekler de, Younger Dryas döneminde Atlantik'teki termohalin dolaşımının etkisini azalttığını ve bu değişikliğe Kuzey Amerika'da buzulların erimesiyle ortaya çıkan çok büyük miktardaki tatlı suyun neden olduğunu göstermekte. Nitekim, günümüzden 14.000 yıl önce Kuzey Amerika'yı kaplayan buzullar çekilmeye başladı ve yüzlerce yıl devam eden erime sonucu

oluşan çok büyük miktarda tatlı su, bugün mevcut olmayan ve Kuzey Amerika'nın kuzeybatısında yer alan Agassiz Gölü'nde birikti. Mississippi nehriyse, gölün fazla sularını Meksika Körfezi'ne taşıyordu. Ancak yaklaşık 11.000 yıl önce gerileyen buzullar, doğuda da bir kanalın oluşmasına yol açtı bunun sonucunda Agassiz Gölü'nün suları St. Lawrence nehri tarafından Atlantik'e taşınmaya başladı. Kuzey Atlantik'e dökülen tatlısu, bu alanda yüzey sularının tuzluluğunu, dolayısıyla yoğunluğunu da azalttı. Bu nedenle Kuzey Atlantik'teki sular okyanusun derinlerine yönelmediği için termohalin dolaşım etkisini yitirdi. Derin suların oluşumu durunca, sıcak yüzey sularının Avrupa'ya ulaşımı da sona erdi. Gulf Stream-Kuzey Atlantik Akıntısı tarafından kuzey enlemlere doğru taşınan sıcak su kütlesinin etkisinden yoksun kalan yerlerde özellikle İskandinavya, İskoçya başta olmak üzere Avrupa ve Kuzey Amerika'da sıcaklıklar azalırken, buzullar tekrar ilerlemeye başladı. Geri dönen buzul çağı, Superior Gölü'nün batısından bir buzulun ilerleyip Agassiz gölünün doğusundaki gideğini kapayınca kadar devam etti. Agassiz Gölü'nün seviyesi, bu sayede 40 m. yükseldi ve fazla sular yine Mississippi nehri aracılığıyla Meksika Körfezi'ne dökülmeye başladı. Gulf Stream akıntısının yeniden kurulmasıyla tekrar başlayan termohalin dolaşımı, sonuçta Avrupa'nın tekrar ısınmasını sağladı. Böylece kısa süreli buzul çağı, termohalin dolaşımının çalışmaya başlamasıyla sona erdi.

Meksika Körfezi'nden alınan derin



deniz tortulları, geçmişte yaşanan bu değişikliği yansıtmakta. Su molekülleri, oksijen 16 ve oksijen 18 izotopları içerir. Sular okyanustan buharlaşıp daha ağır olan oksijen 18 izotopu okyanusta kalır. Buna karşılık, buharlaşan suyun yoğunlaşmasıyla oluşan kar taneleri oksijen 16 izotopu bakımından daha zengindir. Bu nedenle buzul çağlarında karalar üzerinde oluşan buzullarda oksijen 16 izotopu, okyanuslardaki sularda ise oksijen 18 izotopu oranı artış gösterir. Meksika Körfezi'nden alınan ve günümüzden 11.000 yıl öncesine ait planktonların iskeletlerini oluşturan kalkerlerdeki oksijen 18 içeriğinin son derece düşük olması, bu dönemde buzulların erimesiyle oluşan ve oksijen 16 bakımından zengin suların Mississippi yoluyla Meksika Körfezi'ne boşaldığını gösteriyor. Ancak 11.000 yıl öncesine ait örneklerde oksijen 16 oranının azalması, Agassiz Gölü'nün sularının Meksika körfezine boşalmadığının en önemli kanıtı sayılabilir.

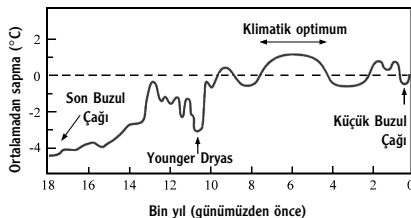
Küresel Sıcaklık Artışı ve Termohalin Dolaşım

"Younger Dryas", okyanus dolaşımı ve iklim arasındaki ilişkinin bölgesel ölçekte en iyi örneği sayıldığı gibi, termohalin dolaşımında meydana gelebilecek bir değişimin, birkaç yüzyıl ya da bin yıllar sürebilecek bir iklim değişimini de başlatabileceğini göstermektedir. İklim modelleri günümüzdeki gibi ılıman iklim koşullarına sahip dönemlerde termohalin dolaşımının aktif olduğunu, buzul çağlarındaysa etkisini yitirdiğini gösteriyor. Bu konudaki bir

başka görüşe göreyse, buzul çağlarında termohalin dolaşım etkisini yitirmekte, sadece derin suların oluşturduğu dolaşımın yeri ve derinliği değişiyor.

Termohalin dolaşımındaki değişimin Kuzey Atlantik'teki yüzey sularının tuzluluğunun azalmasıyla başlayabileceği biliniyor. Bu alanda suların tuzluluğunu, dolayısıyla yoğunluğunu azaltabilecek başlıca faktörlerse, bu bölgede yağış miktarındaki artış, buzulların erimesi ve bunlara bağlı olarak akarsuların akımlarındaki artış.

Günümüzde termohalin dolaşımında değişme olasılığını gündeme getiren en önemli nedense, atmosferde oranı giderek artan CO₂ gibi sera gazlarının yarattığı küresel ısınmadır. Önümüzdeki 70 yıl içinde CO₂ miktarının iki katına çıkması durumu varsayarak oluşturulan iklim modelleri, yüksek enlemlerde yağışın artacağı bunun sonucunda termohalin dolaşımının %10 ile %30 arasında azalacağını öngörmekte. Nitekim, okyanuslarda yapılan ölçümler, geçtiğimiz 75 yılda Kuzey Buz Denizi'ndeki akıntıların ve deniz buzullarının dağılımının değiştiğini göstermekte. Benzer bir sonuç, Bern Üniversitesi tarafından yürütülen araştırmalar sonucunda da ortaya konmuş bulunuyor. Buna göre, önümüzdeki 140 yıl içinde atmosferdeki CO₂ miktarının 4 katına çıkmasının getireceği küresel sıcaklık artışı sonu-



cunda termohalin dolaşım sadece zayıflamayacak, hatta tamamen durabilecektir. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC), değişik sera gazı emisyon senaryoları için hazırlanan iklim modelleri, önümüzdeki 70 yıl içinde atmosferdeki eşdeğer CO₂ birikimlerinin ikiye katlanmasına bağlı olarak termohalin dolaşımının ilk 100 yıl içinde %30 oranında azalacağını göstermekte. 140 yıl içinde CO₂ oranının 4 kat artması durumundaysa, yaklaşık 200 yıl boyunca termohalin dolaşımının tamamen etkisini kaybedeceği ve CO₂ oranı değişmediği sürece böyle kalacağını öngörüyor. Bu durumda, bölgesel sıcaklık dağılışının günümüzden çok farklı olabileceği, Kuzey Atlantik ve Orta Avrupa'da sıcaklıklar 4-5 °C azalırken, güney enlemlerde artacağı da öngörüler arasında. Yapılan diğer modelleme çalışmalarında da elde edilen sonuçlar benzerlik gösteriyor. Gulf Stream ile tropiklerden kuzey enlemlere daha fazla enerji taşınımı kuzeyde sıcaklık artışına, eş zamanlı olarak tropiklerde soğumaya yol açacaktır. Sadece Gulf Stream ile kuzeye olan enerji naklinin durması halinde, güneydeki okyanusların her yüzyıl 1.6°C ısınacağı da öngörüler arasında bulunuyor. Nitekim, derin okyanus tortullarından alınan örnekler, Younger Dryas döneminde Grönland soğurken Antarktika'nın hızla ısındığını gösteriyor.

Şu anda akılları kurcalayan soru, küresel sıcaklık artışının yeni küçük bir buzul çağının oluşumunu tetikleyip tetiklemeyeceği. Yürütülen üç büyük proje olan Dünya Okyanus Dolaşım Deneyi (The World Ocean Circulation Experiment), Arktik İklim Sistemi İncelemesi (Arctic Climate System Study) ve İklimsel Değişim Araştırması (Climate Variability Study) ve nümerik iklim modelleriyle bu soruya yanıt aranmakta.

Yrd. Doç. Dr. Ecmel Erilat
Ege Üni., Edebiyat Fak., Coğrafya Böl.

- Kaynaklar**
Barry R.G. and Chorley R.J. (1998). Atmosphere, Weather and Climate (7th edn), Routledge, London (409 pp.).
Broecker W.S. and Denton G. H. (1990). "What's drives glacial cycles?" Scientific American, January 1990, p. 43-50.
Lockwood J. G. (2001). "Abrupt and sudden climatic transitions and fluctuations: A review" International Journal of Climatology 21: 1153-1179.
Moran J. M., Morgan M. D. and Pauley P. M. (1997). Meteorology. Prentice Hall, New Jersey (530 pp.).
Stocker, T. F. (2000) "Past and future reorganizations in the climate system", Quaternary Science Reviews 19: 301-319.
WMO "World Climate News" No.17, June 2000.